



Materiales para la transferencia de tecnología en la agroindustria de la caña de azúcar



Evaluación de la eficiencia térmica de calderas en ingenios del sector sucro-energético colombiano

Guía metodológica

Diego Fernando Cobo Barrera

Julián Esteban Lucuara Medina

Adolfo León Gómez Perlaza

Nicolás Javier Gil Zapata



Serie: Sistema de
producción industrial

Los autores

Diego Fernando Cobo Barrera, M.Sc.

Nacido el 31 de mayo de 1976 en Cali, Colombia, realizó estudios de pregrado en Ingeniería Mecánica (2002) y de maestría en la línea de estudio de Energía (2012) en la Universidad del Valle. Durante ocho años ha trabajado en ingeniería de procesos mecánicos en Cenicaña, en proyectos referentes a las áreas de extracción y molienda y generación de vapor, principalmente.

Julián Esteban Lucuara Medina

Ingeniero mecánico de la Universidad del Valle (2013), con más de dos años de experiencia en Cenicaña.

Adolfo León Gómez Perlaza, M.Sc.

Ingeniero mecánico de la Universidad del Valle (1974) y M.Sc. de la University of Cincinnati (1979). Vinculado al Programa de Procesos de Fábrica de Cenicaña entre 1993-2006 como asesor en ingeniería mecánica en convenio con la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad del Valle –donde se desempeñó como docente y profesor titular– y desde 2007 hasta la fecha como asesor de tiempo completo.

Nicolás Javier Gil Zapata, Ph.D.

Ingeniero químico, es director del Programa de Procesos de Fábrica desde 2011. Ingresó a Cenicaña en 1995 en el cargo de ingeniero de procesos químicos y con el auspicio del Centro realizó estudios de doctorado en la Louisiana State University (2007).

Evaluación de la eficiencia térmica de calderas

en ingenios del sector sucro-energético colombiano

Guía metodológica



Materiales para la transferencia de tecnología en la agroindustria de la caña de azúcar



Evaluación de la eficiencia térmica de calderas en ingenios del sector sucro-energético colombiano

Guía metodológica

Diego Fernando Cobo Barrera

Julián Esteban Lucuara Medina

Adolfo León Gómez Perlaza

Nicolás Javier Gil Zapata



Serie: Sistema de
producción industrial

Cobo Barrera, Diego Fernando

Evaluación de la eficiencia térmica de calderas en ingenios del sector sucro-energético colombiano. Guía metodológica / Diego Fernando Cobo Barrera [et al.] – Cali: Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia, 2014.

112 p.; 28 cm. (Materiales para la transferencia de tecnología en la agroindustria de la caña de azúcar. Sistema de producción industrial)

978-958-8449-14-2

Incluye referencias bibliográficas

Incluye glosario de términos, acrónimos y abreviaturas

1. Eficiencia energética. 2. Calderas. 3. Energía. 4. ASME-PTC 4.1. 5. Transferencia de tecnología.

I. Lucuara Medina, Julián Esteban. II. Gómez Perlaza, Adolfo León. III. Gil Zapata, Nicolás Javier. IV. Título

621.194

C657

Cenicaña – Biblioteca Guillermo Ramos Núñez

Copyright © 2014 por Cenicaña®

Dirección postal: Calle 58 Norte N°. 3BN-110. Cali, Colombia.
Estación Experimental: vía Cali-Florida km 26,
San Antonio de los Caballeros, Colombia.

www.cenicana.org
buzon@cenicana.org

Noviembre de 2014

Todos los derechos reservados.

Prohibida la reproducción total o parcial de este libro, por cualquier medio, sin permiso de Cenicaña.

Producción editorial: Servicio de cooperación técnica y transferencia de tecnología (SCTT, Cenicaña).

Estrategia de transferencia de tecnología: Camilo H. Isaacs E., jefe SCTT.

Asesoría en gestión del conocimiento: Vicente Zapata Sánchez, consultor.

Nota: esta guía metodológica y las ayudas didácticas relacionadas hacen parte de la colección de materiales para la transferencia de tecnología producidos por Cenicaña como insumos del Programa de Aprendizaje y Asistencia Técnica, PAT, en la agroindustria azucarera colombiana. Quienes reciben los materiales directamente de Cenicaña están autorizados para reproducirlos y adaptarlos en los procesos de capacitación a su cargo, siempre que las modificaciones contribuyan al logro de los objetivos de aprendizaje propuestos por los autores. Cenicaña mantendrá abiertos sus canales formales de comunicación con los usuarios de la guía para intercambiar las actualizaciones en la materia de aprendizaje y atenderá oportunamente las solicitudes de servicios requeridos para la celebración de las actividades pedagógicas de acuerdo con los términos de compromiso definidos en el PAT. Cenicaña no se hace responsable de las decisiones que tomen los destinatarios de la guía en el ejercicio de sus competencias de capacitación.

Advertencia: la mención de productos comerciales en las publicaciones de Cenicaña tiene solamente el propósito de ilustrar a los lectores acerca de las pruebas realizadas y en ningún caso compromete al centro de investigación con los fabricantes y sus distribuidores, quienes no están autorizados para usar los resultados con fines promocionales ni publicitarios.

Referencia sugerida:

Cobo B., D.F.; Lucuara M., J.E.; Gómez P., A.L.; Gil Z., N.J. 2014. Evaluación de la eficiencia térmica de calderas en ingenios del sector sucro-energético colombiano. Cenicaña. Cali, Colombia. 112 p. (Materiales para la transferencia de tecnología en la agroindustria de la caña de azúcar. Sistema de producción industrial)

Agradecimientos

Los autores quieren expresar su agradecimiento a Cenicaña y a los ingenios sucro-energéticos de la región vallecaucana; en especial a las personas vinculadas con los proyectos que han dado lugar al desarrollo de esta guía metodológica, la cual reúne los resultados documentados por el Programa de Procesos de Fábrica desde 1999 hasta la fecha.

A las personas de los ingenios que participaron en las diferentes pruebas de evaluación de la eficiencia térmica de las calderas; particularmente destacan las contribuciones de Víctor Mosquera y Carlos Mora en la revisión y evaluación del material de aprendizaje.

El autor principal quiere agradecerle a Vicente Zapata su apoyo permanente en la gestación de la guía metodológica. De forma personal, a su esposa Saira Bibiana y a sus hijos Juan Diego y José Miguel, por su comprensión y su apoyo en las horas robadas.

Contenido

Presentación	9
La estrategia de transferencia de tecnología	10
Colección de materiales para la transferencia de tecnología en la agroindustria de la caña de azúcar	12
A quién se dirige esta colección	13
Cómo está diseñada la colección	13
Preámbulo	
Evaluación de la eficiencia térmica de calderas en ingenios del sector sucro-energético	14
Introducción	15
A quién se dirige esta guía	15
Cómo usar esta guía	15
Objetivos	17
Estructura general de aprendizaje	18
Exploración de expectativas	19
Autoevaluación inicial	20
Unidad 1	
Introducción al funcionamiento de una caldera típica en un ingenio sucro-energético	22
Introducción	22
Objetivos	22
Estructura de aprendizaje	23
Preguntas iniciales	23
Conceptos básicos	24
• Descripción de una caldera	24
• Clasificación de calderas	24
• Elementos o unidades de trabajo básicos de las calderas	25
• Variables principales de operación	27
Teoría de la combustión	29
• Determinación de la cantidad total de aire que se requiere en la combustión: ejemplo de cálculo para una caldera bagacera	30
Caracterización de los combustibles	32
• Cálculos del poder calorífico superior e inferior del bagazo	34
Determinación de la eficiencia térmica de una caldera	35
Ejercicio 1.1. Operación de una caldera	37
Ejercicio 1.2. Cantidad de aire utilizado en una caldera	39
Ejercicio 1.3. Cálculo del poder calorífico del bagazo	40
Ejercicio 1.4. Elección del método para calcular la eficiencia de calderas bagaceras	41

Unidad 2	Metodología para la evaluación de la eficiencia térmica de calderas	44
	Introducción	44
	Objetivos	44
	Estructura de aprendizaje	45
	Preguntas iniciales	45
	Norma ASME-PTC 4.1 para evaluación de la eficiencia de calderas	46
	• Determinación de las pérdidas de energía	47
	Protocolo sugerido por Cenicaña para evaluar la eficiencia térmica de calderas	50
	• Medición de la composición de gases con equipo portable	50
	• Protocolo de evaluación	53
	Ejercicio 2.1. Normas ASME para la evaluación de la eficiencia de calderas	55
	Práctica 2.1. Toma de datos en fábrica	56
Unidad 3	Determinación de la eficiencia térmica de calderas: identificación de oportunidades de mejoramiento	58
	Introducción	58
	Objetivos	58
	Estructura de aprendizaje	59
	Preguntas iniciales	59
	Procesamiento estadístico de datos	60
	Metodología propuesta por Cenicaña para calcular la eficiencia térmica de una caldera	61
	Pérdida de eficiencia de calderas en un ingenio	63
	Ejercicio 3.1. Uso de Excel® para el procesamiento estadístico de datos	69
	Ejercicio 3.2. Cálculo de la eficiencia térmica de calderas	70
	Ejercicio 3.3. Cómo incrementar la eficiencia térmica de una caldera	71
Unidad 4	Acciones de control en el desempeño de calderas y sus repercusiones en el proceso	72
	Introducción	72
	Objetivos	72
	Preguntas iniciales	72
	Estructura de aprendizaje	73
	Sistema de control en calderas	73
	• Sistema de control del nivel de agua en el domo de vapor	74
	• Sistema de control de presión de vapor vivo	75
	• Sistema de control de presión de hogar	75
	Cogeneración en ingenios sucro-energéticos	75
	• Rendimiento eléctrico equivalente (REE)	76
	Ejercicio 4.1. Ajuste de controles	78
	Ejercicio 4.2. Relación entre la eficiencia térmica de calderas y el REE	79
Anexo		80
Apéndice		98
	Referencias bibliográficas	107
	Acrónimos y abreviaturas	108
	Glosario de términos	109



Presentación

La visión del sector azucarero colombiano para el año 2030 es ubicarlo en un puesto de privilegio a escala mundial. Las diferencias en los índices de productividad son significativas en la prospectiva, de manera que uno de los retos inmediatos de Cenicaña es facilitar la adopción de tecnologías sostenibles que aseguren el mejoramiento de la productividad en armonía con el desarrollo regional.

Esta guía metodológica hace parte de la colección de materiales para la transferencia de tecnología que diseña y dirige Cenicaña con el fin de proveer un marco de referencia técnico y didáctico para desarrollar la estrategia de transferencia y adopción de nuevas tecnologías en la agroindustria.

La colección consta de dos series temáticas, sistema de producción agrícola y sistema de producción industrial, y está conformada por guías metodológicas y ayudas digitales en donde los autores —investigadores y profesionales de Cenicaña— presentan la teoría y la práctica acerca de la oferta tecnológica desarrollada y validada por el centro de investigación junto con los ingenios azucareros y alcohólicos y los cultivadores de caña de azúcar del valle del río Cauca.

Los materiales para la transferencia de tecnología facilitarán el desarrollo de los programas de capacitación que llevarán al sector azucarero a ser más competitivo.

Álvaro Amaya Estévez
Director general, Cenicaña



La estrategia de transferencia de tecnología

Contribuir al desarrollo de las capacidades institucionales requeridas para la adopción de prácticas sostenibles en las unidades productivas de la agroindustria de la caña de azúcar es el propósito prioritario de la gestión de transferencia de tecnología de Cenicaña.

Esto se justifica porque se tienen nuevas tecnologías con potencial para aumentar la productividad azucarera y por tanto, la competitividad del sector.

En lo que concierne a ingenios y cultivadores, su reto es incorporar estos conocimientos y estas tecnologías en los procesos actuales y en las proyecciones de innovación.

Para ello necesitamos afianzar la cooperación técnica interinstitucional en un programa concertado, a través del cual desarrollemos las competencias de cada actor en la transferencia de tecnología, la asistencia técnica y la innovación tecnológica.

La propuesta de Cenicaña para el efecto ha sido discutida con los gremios de productores y estructurada de acuerdo con sus recomendaciones. En ella se formula el modelo de un programa de asistencia técnica dedicado al desarrollo de las capacidades de innovación en las unidades productivas, con base en la gestión de procesos pedagógicos de capacitación en el uso de la tecnología y la gestión de planes de acción para la adopción.

El primer paso del modelo consiste en definir la oferta tecnológica del Programa de Aprendizaje y Asistencia Técnica (identificado con la sigla PAT), documentando la tecnología validada, sus modos de uso y el potencial de adopción. Así se identifican las prioridades del cambio técnico en términos del número de beneficiarios (adoptantes potenciales) que se espera alcanzar con las acciones de transferencia en un horizonte de tiempo dado, y los resultados que se esperan de la intervención.

Enseguida se traduce a lenguaje pedagógico la documentación que sustenta la tecnología materia del PAT y se produce una guía metodológica con los enfoques de gestión del conocimiento y desarrollo de competencias.

Las guías metodológicas contienen los materiales técnicos y didácticos para llevar a cabo la capacitación. Antes de su publicación, son validadas y ajustadas por los autores con el concurso de pares expertos en la materia de aprendizaje y con grupos de destinatarios potenciales.



A continuación, usando las guías metodológicas, sus autores —investigadores y profesionales de Cenicaña— realizan el primer evento de transferencia con los destinatarios directos de los materiales de capacitación, grupos de participantes conformados por quienes aceptan el rol de facilitadores de la transferencia, en el cual son responsables de planificar, celebrar y evaluar los eventos de capacitación con los usuarios finales de la tecnología, así como de acompañarlos en las iniciativas de adopción.

La formación técnica de los facilitadores se complementa con talleres para el desarrollo de las competencias propias del gestor de conocimientos, enfoque, como se dijo, adoptado en los procesos pedagógicos del modelo PAT.

En las actividades de capacitación dirigidas por los facilitadores participan los usuarios finales de la tecnología que hacen parte de organizaciones empresariales comprometidas con la innovación tecnológica, en las cuales se tiene un plan de acción definido para la adopción de nuevas prácticas.

Estas organizaciones son las beneficiarias directas de la estrategia de transferencia, de modo que contribuyen al seguimiento y evaluación de los resultados del PAT mediante el registro de los indicadores de adopción y productividad antes del cambio técnico, durante su implementación y en los años siguientes.

Cenicaña coordina el PAT en la agroindustria azucarera colombiana, se encarga de promover la gestión tecnológica en las organizaciones del sector, realiza el seguimiento y la evaluación del desarrollo del programa y sus resultados, y procura que todos los actores participen en el mejoramiento continuo del modelo.

Para hacer realidad el PAT, el centro de investigación creó la colección de materiales para la transferencia de tecnología, que hasta el momento incluye 19 guías metodológicas, 14 en la serie dedicada al sistema de producción agrícola y 5 en el sistema de producción industrial. Las guías fueron elaboradas con las orientaciones de Vicente Zapata Sánchez, pedagogo y facilitador del desarrollo sostenible con énfasis en la gestión del conocimiento local. Estos materiales son un insumo clave para desarrollar la agenda de actividades de capacitación del PAT que inició en febrero de 2014.

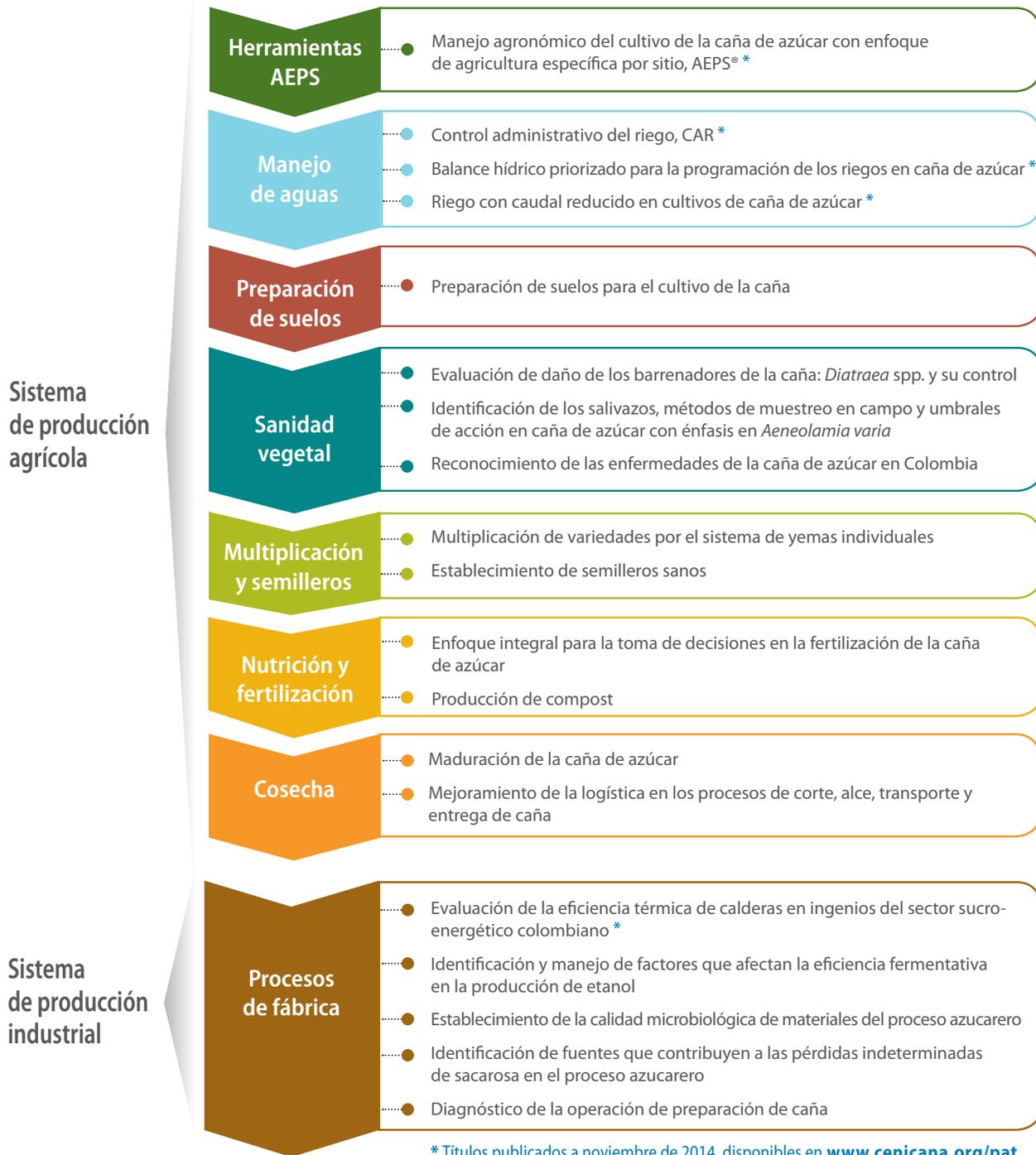
Así, el PAT se integra en la estrategia de transferencia de tecnología del centro de investigación junto con el programa de la red de grupos de transferencia de tecnología (GTT), la validación participativa en fincas de productores, la investigación de mercado y la producción de material divulgativo para la comunicación técnica en la agroindustria. Bienvenido. El reto de la adopción es ahora.

Camilo H. Isaacs E.

Jefe del Servicio de Cooperación Técnica
y Transferencia de Tecnología, Cenicaña



Colección de materiales para la transferencia de tecnología en la agroindustria de la caña de azúcar





A quién se dirige esta colección

La colección de materiales para la transferencia de tecnología en la agroindustria de la caña de azúcar está dirigida a los profesionales de distintas disciplinas vinculados con el sector azucarero colombiano, que en sus competencias de rol ejercen como facilitadores de la transferencia tecnológica y la adopción, particularmente a quienes planifican, ejecutan y evalúan las actividades de capacitación en las que participan los usuarios finales de la tecnología vinculados al Programa de Aprendizaje y Asistencia Técnica (PAT). Algunos materiales de la colección están dirigidos a los participantes en la capacitación y les serán entregados por los facilitadores.

Cómo está diseñada la colección



La colección está organizada en dos series temáticas: sistema de producción agrícola y sistema de producción industrial, cada una conformada por varias guías metodológicas en las que se presentan las tecnologías validadas por Cenicaña que son objeto de adopción por el sector productivo.

Cada guía metodológica consta de un volumen impreso y de ayudas didácticas, materiales diseñados por Cenicaña en una estructura dispuesta a la gestión del conocimiento y el desarrollo de competencias.

En el volumen impreso, como preámbulo para el aprendizaje, cada autor describe la estructura general de los contenidos y los objetivos de la capacitación, explica

a quién está dirigida la guía y el modo de usarla, al tiempo que ofrece los instrumentos para la exploración de expectativas y la autoevaluación inicial de conocimientos.

Los contenidos técnicos propiamente dichos están organizados en unidades de aprendizaje, con su propia estructura según el criterio del autor. Una unidad de aprendizaje puede contener: introducción, objetivos, estructura de aprendizaje, preguntas iniciales, documentación técnica, ejercicios y prácticas, recursos digitales, autoevaluaciones, referencias bibliográficas, glosario, siglas y abreviaturas; también puede incluir un anexo técnico con documentos complementarios para el logro de los objetivos de aprendizaje.

Finalmente, en el apéndice didáctico se encuentran las indicaciones para el uso de los recursos digitales, los instrumentos de autoevaluación final de conocimientos y la evaluación de la capacitación.

Evaluación de la eficiencia térmica de calderas en ingenios del sector sucro-energético



Salida limpia de gases de combustión

Introducción

La caldera es un componente del esquema energético de un ingenio y su función es aprovechar la energía química del bagazo y transformarla en energía térmica de vapor. El bagazo resultante del proceso de obtención de azúcar es el combustible principal de la caldera, por lo tanto, es importante para mantener una operación eficiente y garantizar un balance adecuado en el esquema energético del ingenio.

En la primera unidad de la presente guía se describen los componentes principales de una caldera y se trata el tema de la combustión; en la segunda, se describen las principales normas y metodologías para evaluar la eficiencia térmica de las calderas; se presentan casos exitosos en los cuales se ha logrado incrementar la eficiencia; en la tercera unidad y en la cuarta se describen las principales estrategias de control aplicables a las calderas típicas de ingenios azucareros y se trata la relación de la eficiencia térmica de la caldera con el esquema de cogeneración en un ingenio sucro-energético.

A quién se dirige esta guía

La guía está dirigida a los profesionales y a los técnicos encargados de los procesos de funcionamiento y operación de las calderas en los ingenios sucro-energéticos colombianos, donde son responsables de la gestión del desempeño de las calderas. El grupo está integrado por ingenieros y supervisores, quienes participan en la capacitación dirigida por Cenicaña para fortalecer sus habilidades como facilitadores de la transferencia tecnológica y la gestión de conocimiento. El alcance de sus competencias de capacitación se define de acuerdo con los objetivos del Programa de Aprendizaje y Asistencia Técnica (PAT) y la organización propia de cada ingenio. Se identifican en la guía como facilitadores del PAT.



Cómo usar esta guía

Este material está estructurado siguiendo las tendencias actuales para la formación de recursos humanos y la adopción de nuevas tecnologías que comprenden la capacitación centrada en competencias y el aprendizaje basado en la gestión de conocimiento.

La guía fue diseñada a partir del análisis de las competencias que ejercen las personas encargadas de la gestión del desempeño de las calderas en un ingenio sucro-energético, específicamente en la evaluación de la eficiencia térmica de las calderas. El proceso partió de la identificación de las capacidades (actitudes, habilidades mentales, destrezas perceptuales y físicas) que se requieren para ejercer las competencias esperadas.

Para facilitar el aprendizaje, la guía contiene una serie de herramientas didácticas que le ayudarán al facilitador para organizar y dirigir las actividades de capacitación a su cargo:

- 1. Exploración de expectativas:** dinámica grupal para motivar a los participantes en el proceso de capacitación; es el momento de la presentación personal, una oportunidad para conocerse y manifestar las expectativas, aclarar cuáles pueden ser satisfechas y cuáles no.

- 2. Autoevaluación de conocimientos:** se sugiere la autoevaluación individual antes de comenzar el programa de capacitación y una vez concluye. En esta guía se incluyen sendos cuestionarios con preguntas acerca de los temas de aprendizaje; el facilitador podrá aprovechar la presentación de las respuestas correctas para favorecer el diálogo y la discusión del grupo en pleno acerca de los asuntos técnicos de interés. La autoevaluación inicial y la dinámica de retroinformación le servirán al facilitador para hacerse una idea sobre el nivel de introducción de los participantes, lo cual le ayudará para orientar las actividades pedagógicas de acuerdo con los conocimientos básicos de los participantes.
- 3. Preguntas iniciales:** antes de desarrollar cada unidad de aprendizaje, el facilitador puede plantear algunas preguntas que le permitan explorar el conocimiento que los participantes tienen sobre la materia específica que tratará en la unidad. Se sugiere que sean preguntas abiertas y que se formulen al grupo para su discusión, buscando respuestas consensuadas por los participantes.
- 4. Objetivos y estructura de aprendizaje:** los alcances del programa de capacitación y el modo sugerido para cumplir satisfactoriamente con los propósitos formativos se presentan al comienzo de la guía (en este aparte dispuesto como preámbulo) y en cada unidad de aprendizaje. Los objetivos son mensajes que orientan al participante sobre las capacidades que puede desarrollar mediante la capacitación para ser competente en el uso de la tecnología. Las estructuras son esquemas que muestran de forma resumida la tecnología que se quiere compartir y analizar, junto con las actividades pedagógicas propuestas para el efecto.
- 5. Ejercicios y prácticas de campo:** en cada unidad se proponen actividades para realizar con los participantes, que tiene el propósito de reforzar el logro de los objetivos de aprendizaje en los distintos temas que se consideran prioritarios para el uso adecuado de la tecnología de evaluación de la eficiencia térmica de calderas en los ingenios sucro-energéticos. La guía contiene diez ejercicios y una práctica de campo; se sugiere realizar estas actividades en el momento oportuno, siguiendo las recomendaciones para la organización y el desarrollo que se indican en cada caso.
- 6. Recursos digitales:** el texto completo de la guía y los recursos digitales necesarios para la formación de los participantes y para el análisis de los indicadores de eficiencia de las calderas, como es el caso de la aplicación EFICAL[®], se encuentran disponibles en el sitio web del PAT: www.cenicana.org/pat. Los facilitadores deben registrarse en el sitio web de Cenicaña acceder a estos recursos.

Se les recomienda a los facilitadores que revisen la totalidad de la presente guía como paso inicial para planificar la capacitación. Esta revisión les permitirá disponer los recursos necesarios para las actividades pedagógicas y para dirigir el proceso de gestión de conocimiento acerca de la tecnología que aquí se presenta.

Sugerencia: antes de presentar los objetivos y la estructura de aprendizaje realice la Exploración de expectativas y la Autoevaluación inicial (p.18 y p.19)

Objetivos

Con las actividades de capacitación se buscan los siguientes objetivos generales:

- Proporcionar herramientas de evaluación al personal encargado de la gestión del desempeño de las calderas en los ingenios azucareros para el monitoreo constante y acertado de la eficiencia térmica de los equipos de generación de vapor.
- Mantener la eficiencia en la producción de vapor en el ingenio con el fin de garantizar el mantenimiento de los indicadores de desempeño energético del proceso productivo.

En relación con las competencias específicas que desarrollarán los participantes, se espera que al finalizar las actividades de aprendizaje los encargados de la gestión de calderas estén capacitados para:

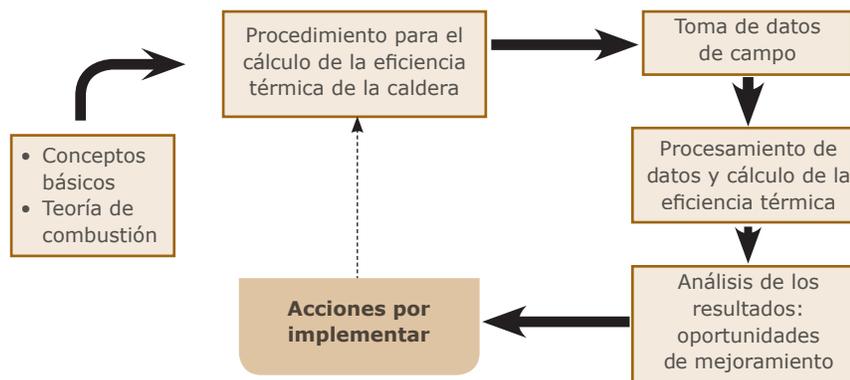
- Explicar las variables principales de operación de una caldera y las labores de toma de datos en fábrica para la evaluación de la eficiencia térmica de la caldera.
- Especificar las variables de la operación fabril que deben medirse sistemáticamente para determinar la eficiencia térmica de las calderas e instruir al personal asignado para la tarea acerca del número de datos requeridos, los tiempos y las condiciones que deben tener las variables.
- Organizar los datos recolectados según los principios de la estadística descriptiva básica, empleando programas como Excel®.
- Calcular la eficiencia térmica de la caldera con los métodos directo e indirecto, a partir de los datos tomados en fábrica.
- Explicar la metodología de operación de la caldera y su relación con el sistema de control.
- Identificar las consecuencias energéticas de la pérdida de eficiencia en la caldera, como una prioridad en la labor diaria del encargado de la gestión del desempeño de la caldera.



Hogar con presión positiva

Estructura general de aprendizaje

Evaluación de la eficiencia térmica de calderas



La estructura muestra la secuencia de aprendizaje propuesta en esta guía

Los temas han sido ordenados en cuatro unidades que incluyen diez ejercicios y una práctica de campo, actividades diseñadas para consolidar los conocimientos y la confianza de los participantes en la evaluación del desempeño térmico de las calderas y en la gestión de cogeneración en los ingenios. Las actividades facilitan la gestión del conocimiento para asegurar la operación óptima de las calderas y garantizar la eficiencia térmica del sistema de cogeneración en el sector sucro-energético colombiano. Los facilitadores del PAT pueden seguir la secuencia propuesta o ajustarla de acuerdo con su criterio; en todo caso, para definir la estrategia pedagógica y programar las jornadas de capacitación deben establecer las competencias específicas de cada grupo de aprendices y su nivel de formación.

Unidad 1: describe los elementos constitutivos de una caldera y las variables principales de operación; los conceptos básicos acerca de la teoría de la combustión, la caracterización de los combustibles y las generalidades para la determinación de la eficiencia térmica a través de los métodos directo e indirecto. Se proponen cuatro ejercicios con los participantes para afianzar los conocimientos indicados.

Unidad 2: presenta la norma técnica definida por la *American Society Mechanical Engineers* (ASME, por su sigla en inglés) en relación con la determinación de la eficiencia térmica de calderas y especifica la metodología propuesta por Cenicaña para las pruebas de fábrica y la evaluación de los indicadores de resultado. Incluye un ejercicio y una práctica de campo.

Unidades 3 y 4: con base en los datos de campo se calcula la eficiencia térmica de una caldera y se identifican las oportunidades de mejoramiento. Finalmente se presentan los lazos de control de calderas en sistemas de cogeneración específicos del sector sucro-energético; en total se proponen cinco ejercicios en estas unidades, uno de ellos para observar la influencia de la eficiencia térmica de la caldera en los indicadores de rendimiento energético del sistema de cogeneración.

Exploración de expectativas

Objetivo: esta actividad se realiza para fomentar las relaciones personales en el grupo y para que los participantes se familiaricen con el tema principal de la capacitación. Se espera que todas las personas inscritas en el programa de aprendizaje participen en la actividad.

Orientaciones para el facilitador

La dinámica comienza con la presentación de cada participante, quien dice su nombre, experiencia laboral, ingenio al que pertenece y cargo actual; el facilitador habrá hecho lo propio. Se requiere un salón con mesas disponibles para el trabajo de varios grupos.

1. Pídales a los participantes que formen grupos de cuatro personas o más. Infórmeles que dedicarán hasta 30 minutos para el trabajo en grupo.
2. Entréguele a cada grupo las instrucciones y los materiales necesarios:
 - Diez pliegos de papel periódico (puede ser reciclado)
 - Un rollo de cinta adhesiva transparente
 - Un reloj con segundero o un cronómetro
 - Una regla o una cinta métrica
 - Una tijera para papel (opcional)
3. Concluya la dinámica dedicando 30 minutos al análisis y la discusión de los resultados:
 - Defina con los participantes una metodología única para determinar el desempeño en la tarea y obtenga el valor de desempeño de grupo.
 - Destaque los mejores resultados y luego invite a los participantes para que comparen esta actividad con el desempeño de una calera de un ingenio.

Instrucciones para los participantes

Organizados en grupos de cuatro integrantes como mínimo, el reto es construir una torre de un metro de altura en el menor tiempo posible y con la menor cantidad de recursos.

- 1 Registre el tiempo total y las cantidades de los materiales empleados en la obra.
- 2 Obtenga el valor de desempeño del grupo en la construcción de la torre.
 - Encuentre un indicador que relacione la cantidad de hojas de papel utilizadas, la longitud total de cinta gastada y el tiempo invertido.
- 3 Participe en la dinámica de retroinformación; siga las orientaciones del facilitador.



Recurso digital
www.cenicana.org/pat

Autoevaluación inicial

Objetivo: el siguiente cuestionario tiene por objetivo que los participantes identifiquen su nivel de conocimiento en la materia de aprendizaje antes de comenzar la capacitación. No tiene carácter calificativo. Tiempo estimado para responder: 30 minutos.

Instrucciones

Cada pregunta tiene una respuesta única: marque con 'X' la opción que considere correcta en cada caso. Una vez complete todo el cuestionario, espere las indicaciones del facilitador para continuar. No es necesario que firme esta evaluación.

- 1. ¿Cuáles de las siguientes variables de operación están involucradas directamente en la determinación de la eficiencia térmica de la caldera?**
 - A. humedad de combustible, producción de vapor, tasa de molienda, presión de vapor de escape
 - B. producción de vapor, consumo de combustible, composición de gases, poder calorífico del combustible
 - C. presión de vapor vivo, % de oxígeno en gases, presión aire secundario, temperatura del agua de alimentación.

- 2. ¿Qué consideración se debe tener en cuenta en la toma de datos en fábrica?**
 - A. verificar que la tasa de molienda sea la presupuestada en el mes
 - B. asegurar que los equipos de medición estén con calibración vigente
 - C. controlar la apertura de la válvula de agua de alimentación de la caldera.

- 3. ¿Cuáles son las ayudas más apropiadas para demostrar la forma correcta de manejo de los equipos para captura de datos en fábrica?**
 - A. manual de operación de los equipos, valores promedio de operación de la caldera
 - B. manual de operación de los equipos, normas de seguridad industrial, demostración en campo
 - C. ayudas audiovisuales, normas de seguridad industrial.

- 4. Durante la evaluación de la eficiencia térmica ¿cuál es el punto más adecuado para tomar muestras del combustible que ingresa a la caldera?**
 - A. en la bodega de bagazo, tomándolo de la pila
 - B. en el conductor de bagazo final, cuando está llegando a la caldera
 - C. en los 'chutes' de los alimentadores de combustible de la caldera.

5. **¿Cuáles elementos de protección son los más apropiados en la toma de datos de composición de gases en la salida del hogar de la caldera?**
- A. botas de seguridad industrial, guantes de látex, mascarilla de tela
- B. botas de seguridad, gafas, tapa-oidos, casco, camisa de manga larga y guantes de carnaza
- C. arnés de seguridad, casco de protección, bata blanca.
6. **Según las normas ASME PTC-4.1 para la evaluación de la eficiencia térmica de calderas ¿cuál debe ser el tiempo mínimo de evaluación?**
- A. 8 horas B. 4 horas C. 1 hora.
7. **¿Qué diferencias existen entre los métodos directo e indirecto para el cálculo de la eficiencia térmica de la caldera?**
- A. en el método directo se tiene en cuenta la tasa de molienda promedio, mientras que en el indirecto se calcula la tasa de molienda por balance
- B. el método indirecto emplea el cálculo de las pérdidas de calor y energía y el método directo contabiliza el calor y la energía producidos en el vapor y entregados por el combustible
- C. los métodos directo e indirecto siguen iguales fórmulas de cálculo, solamente se diferencian en el tipo de datos empleados.
8. **En el caso de mayor porcentaje de pérdidas de eficiencia por calor en gases secos se deben tomar medidas como:**
- A. disminuir el calor perdido en los equipos finales de recuperación
- B. reducir la humedad del combustible que ingresa al hogar
- C. controlar el caudal de gases emitidos a la atmósfera.
9. **¿Cuáles son los principales lazos de control en el desempeño de una caldera?**
- A. flujo de agua de alimentación, flujo de vapor vivo, flujo de aire suministrado
- B. nivel de domo, aire de combustión, presión del hogar
- C. lazo abierto, lazo cerrado, lazo intermedio.
10. **¿Cuáles de las siguientes situaciones propias del proceso productivo de fábrica afectan el desempeño energético de la caldera?**
- A. mayor contenido de fibra (%caña) en el material que ingresa a la fábrica
- B. incremento en el contenido de materia extraña mineral en la caña molida
- C. Paros por falta de caña en patios.

Respuestas correctas: 1=B; 2=B; 3=B; 4=B; 5=B; 6=B; 7=B; 8=B; 9=B; 10=B

Introducción al funcionamiento de una caldera típica en un ingenio sucro-energético

Introducción

Los generadores de vapor o calderas están entre los equipos de mayor valor económico existentes en una fábrica; su importancia radica en que son los encargados de convertir la energía química contenida en el combustible, generalmente bagazo, en energía térmica en forma de vapor, la cual es utilizada en los procesos de preparación de caña, molienda, plantas eléctricas, tratamiento de jugos, elaboración de azúcar y destilación de alcohol, entre otros.

En esta unidad de aprendizaje se tratan los temas relacionados con el balance de la combustión y la determinación de la cantidad de aire requerido según el tipo de combustible empleado; se analizan los métodos directo e indirecto para determinar la eficiencia térmica en una caldera; igualmente se explican el funcionamiento básico de una caldera y las relaciones de las principales variables de operación con el desempeño de la misma. Este es el punto de partida en el proceso de determinación de la eficiencia térmica, ya que en él se proponen las bases y los principios para la identificación de las variables propias de operación más importantes en el funcionamiento correcto de la caldera.

Objetivos

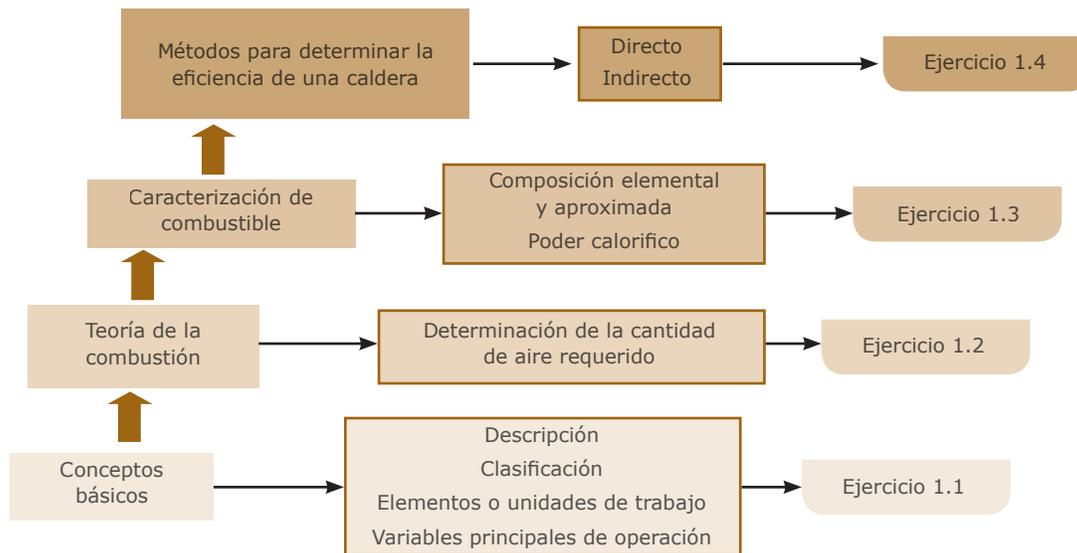
Con el desarrollo de esta primera unidad de aprendizaje y la participación en las actividades propuestas, el ingeniero o el supervisor encargado de la gestión de la caldera en un ingenio sucro-energético tendrá la oportunidad de fortalecer sus conocimientos técnicos y sus habilidades para ejercer las competencias siguientes:

- Identificar las variables de operación que determinan la eficiencia térmica de una caldera
- Explicar las variables principales de operación de una caldera involucradas en la determinación de su eficiencia térmica

Se espera, así mismo, que el participante muestre interés en el funcionamiento de las calderas de su ingenio y el desempeño de térmico de las mismas.

Estructura de aprendizaje

Introducción al funcionamiento de una caldera



En esta unidad se revisan los conceptos básicos de la operación de una caldera

Se hace un repaso del proceso de combustión y de las características de los combustibles típicos empleados en los ingenios colombianos; igualmente, se presentan los métodos directo e indirecto para determinar la eficiencia térmica de una caldera; para lograr los objetivos de aprendizaje se proponen cuatro ejercicios interrelacionados al respecto. Se espera que los ejercicios refuercen en los participantes su destreza para distinguir las variables involucradas en el cálculo de la eficiencia de operación de una caldera.

Preguntas iniciales

Objetivo: estimular la participación y el interés del grupo en la materia de aprendizaje.

Orientaciones para el facilitador

Antes de entrar en materia, converse con los participantes acerca de:

1. ¿qué es una caldera?
2. ¿cuál es el equipo que suministra la cantidad de aire que se necesita para la combustión en el hogar de una caldera?
3. ¿cómo se calcula la eficiencia de una caldera?
4. ¿cuál es la mejor caldera en el ingenio donde cada quien trabaja? ¿por qué?

Conceptos básicos

Descripción de una caldera

Una caldera es básicamente un generador de vapor, cuyo principio de funcionamiento es la transferencia de calor desde los gases calientes, producidos por combustión de material combustible, hacia el agua que se transforma en vapor. Un ingenio azucarero trabaja con un alto número de procesos de intercambio de calor, utilizando vapor como fluido calefactor; así, existen turbinas a vapor para la generación de energía mecánica, especialmente en el área de preparación y molienda; adicionalmente, se requieren importantes cantidades de electricidad que se generan en turbogeneradores del ingenio. Las calderas suministran el vapor necesario a los procesos antes mencionados y su principal combustible en la industria azucarera es el bagazo; en algunos casos el bagazo se complementa con carbón o con fueloil.

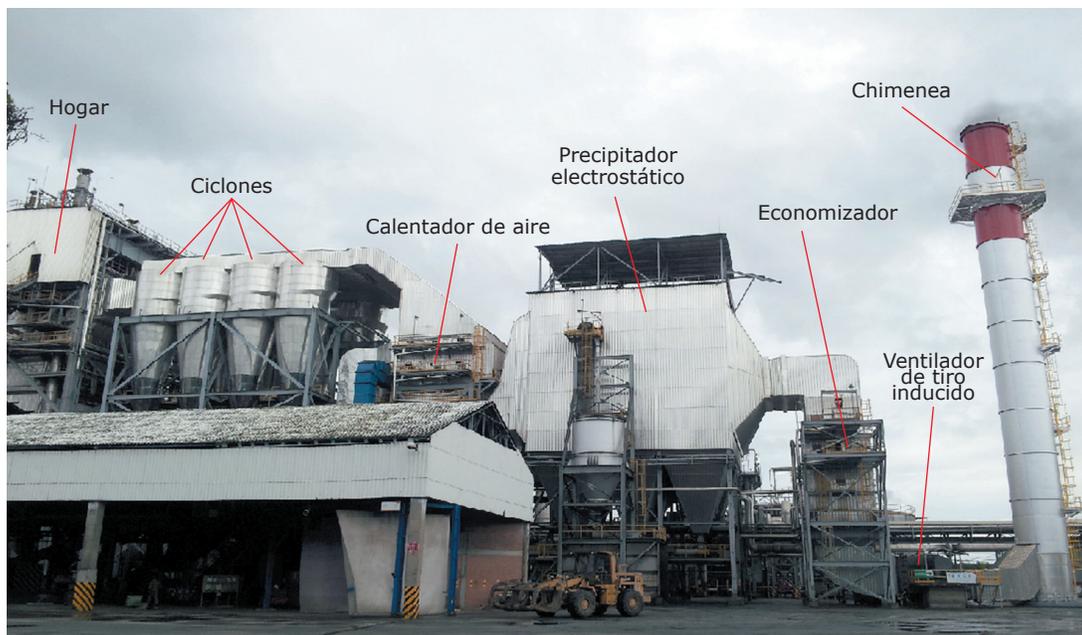
Clasificación de calderas

Existen varios criterios para la clasificación de las calderas, entre ellos los principales son:

1. **Por disposición de los fluidos:** bien sea que los tubos conduzcan los humos de la combustión (caldera tipo piro-tubular) o el agua que se evapora (caldera tipo acuotubular, **foto 1.1**).

Foto 1.1

Caldera de un ingenio sucro-energético colombiano y sus partes principales



2. **Por la presión y la temperatura de trabajo:** se dividen en las categorías de baja presión (hasta 60 psi), media presión (hasta 150 psi) y alta presión (mayor que 150 psi). Actualmente se trabajan presiones hasta 1200 psi y se alcanza estados supercríticos de vapor.
3. **Según el tipo de combustible utilizado:** los combustibles pueden ser sólidos (carbón, bagazo, madera, etcétera), líquidos (fueloil, ACPM) o gaseosos (gas natural, gas propano, gas butano)
4. **Por la forma de quemar el combustible:** si el combustible es sólido se puede hacer referencia a parrillas o lecho fluidizado; si es líquido se clasifican según la presión de atomización y si es gaseoso se dividen según se mezcle o no el gas.

Las calderas tipo acuo-tubular (foto 1.1) son las más comunes en los ingenios de la región, trabajan con presiones medias y altas y utilizan combustibles sólidos en parrillas fijas o viajeras. Este es el tipo de caldera al cual se hace referencia en esta unidad de aprendizaje.

Elementos o unidades de trabajo básicos de las calderas

Una caldera acuo-tubular está constituida por las siguientes unidades básicas (**figura 1.1**):

1. **Cámara de agua:** es el espacio del cuerpo de la caldera o del cuerpo cilíndrico ocupado por agua (fase líquida)
2. **Cámara de vapor:** espacio del cuerpo de la caldera reservado para el vapor.
3. **Hogar:** recinto donde se realiza la combustión.
4. **Domo:** se denomina así a cada uno de los cuerpos cilíndricos mayores hacia los cuales convergen los tubos hervidores de las calderas acuo-tubulares. El domo de vapor (domo superior) es uno de los principales elementos de la caldera y es donde se produce la separación del vapor y la fase líquida. El domo de lodos (inferior) es el recipiente al cual llega la fase líquida de agua que no se evaporó en el domo superior.

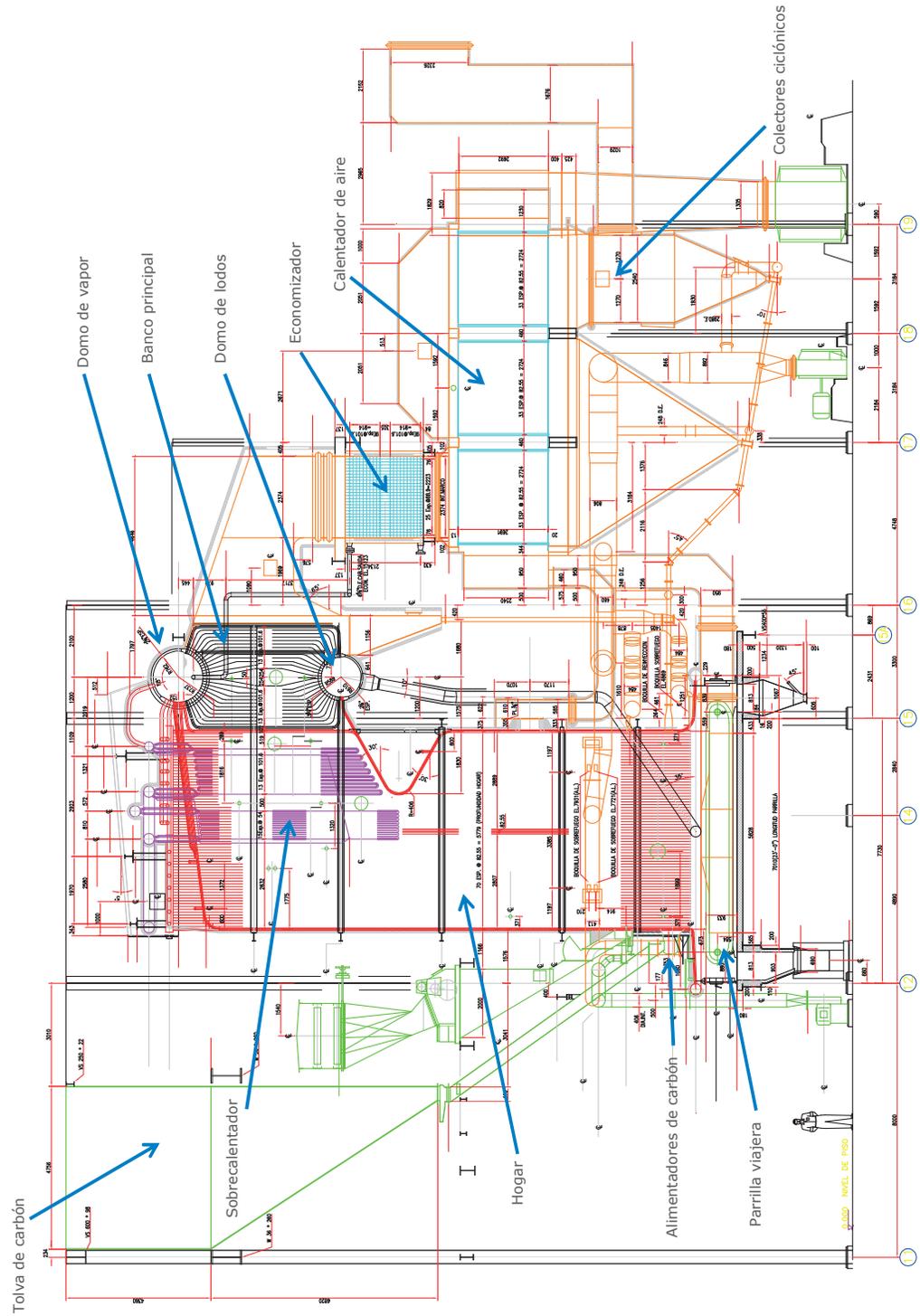
Adicionalmente, una caldera puede contar con diferentes sistemas o equipos de recuperación de calor que le permiten incrementar su eficiencia, entre ellos:

5. **Calentador de aire:** consiste en un dispositivo recuperador de calor destinado a elevar la temperatura del aire que participará en la combustión, aprovechando la corriente de los gases generados en la combustión previa.
6. **Economizador:** es un dispositivo que actúa como recuperador del calor que se emplea para incrementar la temperatura del agua de alimentación de la caldera utilizando la corriente de los gases de la combustión antes de que sean llevados a la chimenea. Lo usual es que se encuentre después del calentador de aire, sin embargo no hay configuración fija.
7. **Sobrecalentador (o recalentador de vapor):** es un dispositivo utilizado para elevar la temperatura del vapor saturado proveniente del domo superior a través de la transferencia de calor desde los gases de combustión que salen del hogar.

Figura 1.1

Esquema de una caldera acuo-tubular con sus partes principales

Adaptado de: Aponte, 2011



Para mejorar el suministro de aire a la caldera y la disposición de los gases de combustión, generalmente se emplean dos tipos de ventiladores:

- 8. Ventilador de tiro forzado:** introduce aire hasta el hogar de la caldera y ayuda a la generación de una presión positiva dentro del hogar, lo que facilita el desalojo de los gases de combustión.
- 9. Ventilador de tiro inducido:** extrae los gases de la combustión; trabaja con presión negativa en la succión para ayudar en la entrada de aire al hogar de la caldera. Finalmente, la presión en el hogar resulta de un balance de las presiones generadas por los ventiladores y se encuentra por debajo de la presión atmosférica.

Variables principales de operación

Los procesos de operación de una caldera se pueden describir de la forma siguiente:

(1) el aire primario es introducido por acción del ventilador de aire forzado hasta la cámara de combustión, donde se mezcla con el combustible (bagazo o bagazo + carbón) para dar inicio al proceso de liberación de la energía química; (2) una vez el bagazo libera gases volátiles y alcanza la temperatura de ignición, el aire secundario, que ingresa al hogar en un nivel de altura media, participa activamente de la combustión; (3) los humos generados en la combustión calientan los tubos que conducen agua en fase líquida hasta cuando ésta se evapora y se acumula en el domo superior; aquí también llega el agua de alimentación para garantizar un nivel controlado en el domo; (4) el vapor sale del domo superior y pasa por un banco de tubos denominado sobrecalentador o recalentador de vapor, desde donde se distribuye a los diferentes procesos; (5) el ventilador de tiro inducido extrae los gases de la combustión y los lleva hasta la chimenea después de transportarlos por diferentes espacios de la caldera (recalentador de vapor, calentador de aire, economizador, ciclones, precipitador electrostático) donde se aprovecha al máximo el contenido de energía presente en los gases.

En el proceso de operación de una caldera se pueden distinguir las siguientes corrientes y sus variables principales:

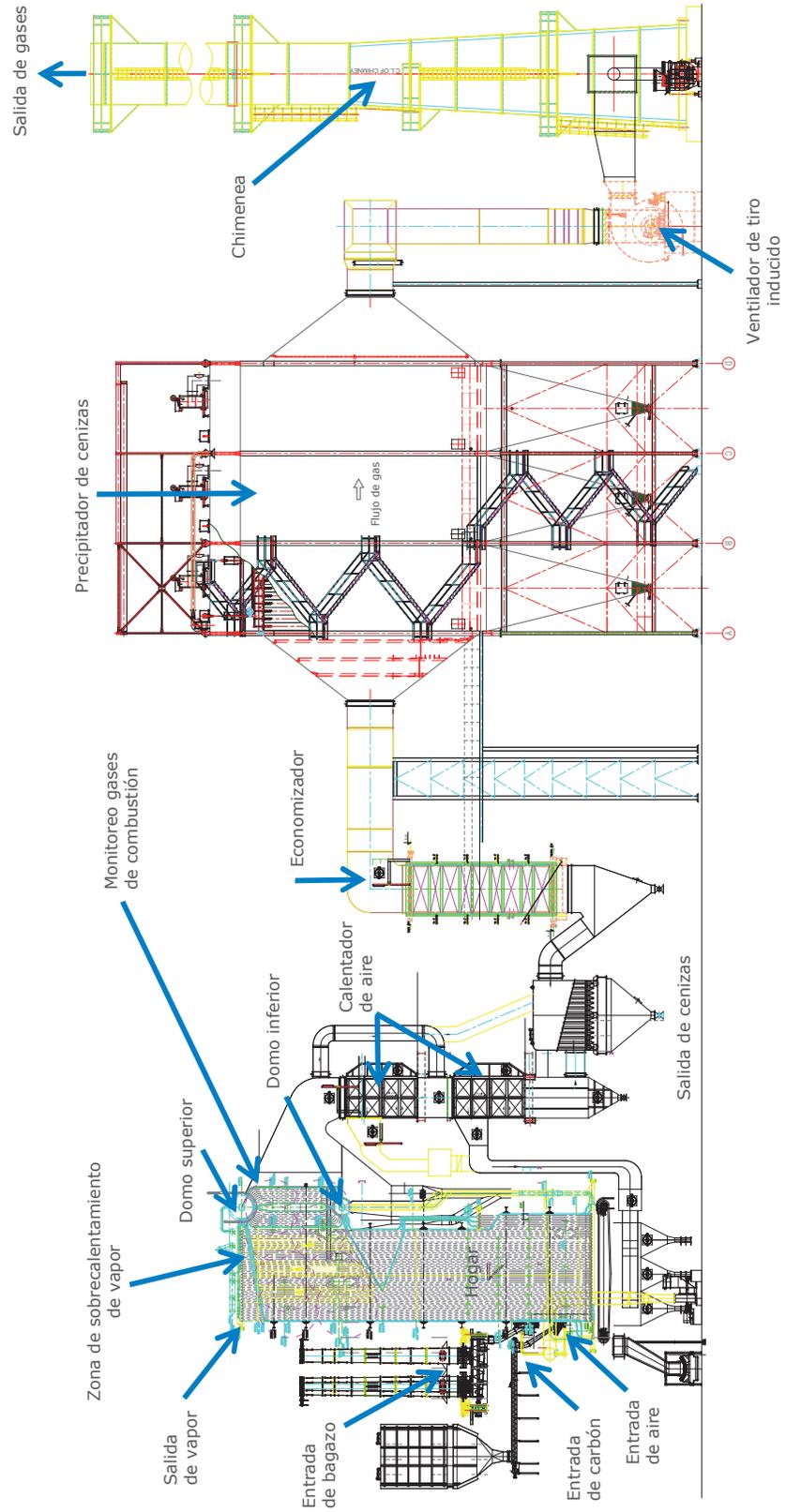
- Aire: temperatura, presión y caudal
- Combustible: caudal, poder calorífico, humedad y contenido de cenizas
- Gases de combustión: temperatura, presión y caudal
- Agua: temperatura, presión y caudal
- Vapor: temperatura, presión y caudal.

En la **figura 1.2** se presenta el esquema de una caldera típica de un ingenio sucro-energético donde se identifican los componentes principales y las variables de operación.

Sugerencia: antes de continuar con el tema siguiente realice el ejercicio 1.1 (p.37)

Figura 1.2

Esquema general para una caldera típica de un ingenio azucarero donde se identifican las principales variables de operación



Teoría de la combustión

La combustión es una reacción química del combustible en la cual se libera calor, que en el caso de una caldera de un ingenio sería del bagazo con el oxígeno presente en el aire. Los productos principales de la combustión son: (1) una parte gaseosa conformada por compuestos como el dióxido de carbono, el monóxido de carbono, el agua y el oxígeno, principalmente; y (2) después de la combustión de la biomasa queda una parte sólida o residuo, algunas veces denominada ceniza, la cual está conformada por diferentes materiales inorgánicos.

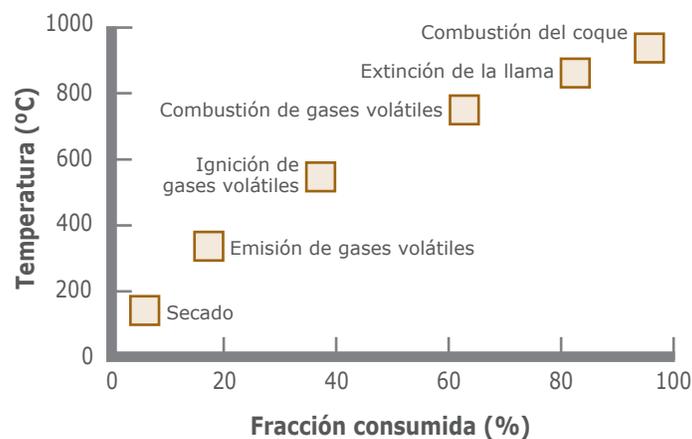
Para alcanzar la combustión se debe incrementar la temperatura de la biomasa hasta el punto de inflamación, el cual se considera como el nivel de temperatura en el cual el combustible genera vapores que pueden arder; para lograrlo se debe aportar calor al combustible en forma indirecta por medio del aire que llega al hogar de la caldera. En un primer paso se seca la biomasa y se produce una liberación de gases volátiles inflamables, los primeros en reaccionar por encima del lecho de la parrilla; en un segundo paso el residuo sólido reacciona sobre la parrilla, como se observa en la **figura 1.3** para el caso de la madera.

Esta división de procesos exige que la cantidad de aire que ingresa al hogar de la caldera sea igualmente dividido entre aire primario (que entra al hogar por debajo de la parrilla: entre 40-70% del aire total) y aire secundario (que llega en los aires de sobrefuego: el necesario para alcanzar 100% del total por emplear)

Figura 1.3

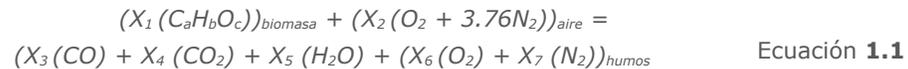
Etapas de la combustión de la madera

Tomado de: Silva Lora, 2003



Determinación de la cantidad total de aire que se requiere en la combustión

Para realizar un análisis estequiométrico del proceso de combustión y determinar la cantidad de oxígeno presente en el aire que es requerido en el proceso de combustión, es posible emplear el modelo de reacción química que se presenta en la ecuación **1.1** (reacción general para combustión de biomasa)



donde: los coeficientes $X_1, X_2 \dots X_7$ representan la cantidad molar o volumétrica de cada uno de los productos y reactantes que logran el balance en la reacción de combustión. Los coeficientes a, b y c de la biomasa indican su composición química y son determinados por medio de un análisis de composición elemental. Dependiendo de la ausencia o presencia de monóxido de carbono (CO) se considera una reacción en condición completa o incompleta. En la práctica es muy difícil alcanzar la combustión completa del combustible sólido en el hogar de la caldera, por tanto siempre se debe considerar la formación de monóxido de carbono en los productos de la reacción.

Ejemplo de cálculo para una caldera bagacera

Por medio de este ejemplo se muestran los pasos sugeridos para determinar la cantidad de aire necesario para la combustión de bagazo en una caldera de un ingenio azucarero que procesa alrededor de 180 t/hora de caña y produce en promedio 150,000 lb de vapor; la relación bagazo/caña es de 27%.

Si la caldera maneja un indicador de producción de vapor equivalente a 1.8 lb/lb de bagazo, para determinar la cantidad total de aire requerido en la combustión se debe:

1. Calcular la cantidad total de combustible (caudal) empleado en la caldera

$$\begin{aligned} \text{Caudal de combustible} &= (150,000 \text{ lb de vapor/hora}) / (1.8 \text{ lb de vapor/lb de bagazo}) \\ &= 83,333.3 \text{ lb de bagazo/h} = 37.88 \text{ t de bagazo/h} \end{aligned}$$

2. Calcular la cantidad de bagazo disponible y comprobar si se requiere combustible adicional

$$\begin{aligned} \text{Cantidad de bagazo disponible} &= (180 \text{ t caña/hora}) * 0.27 \text{ bagazo/\% caña} \\ &= 48.6 \text{ t de bagazo/h} \end{aligned}$$

En este caso, la cantidad de bagazo disponible es mayor que la requerida; por tanto, en las condiciones analizadas, el ingenio no requiere bagazo u otro combustible adicional.

3. Realizar el balance estequiométrico de la reacción de combustión (anexo técnico

1). Se debe conocer el balance por elementos entre reactantes y productos en la condición de combustión completa, es decir, sin la presencia de CO en los productos. Para el bagazo, la relación estequiométrica aire-combustible es de 4.276, sin considerar la humedad del

combustible que entra a la caldera; al realizar la corrección por base húmeda (48% de humedad del bagazo) el valor es de 2.34; sin embargo, para garantizar que se produzca una mezcla apropiada aire:combustible, el primero debe ser empleado en exceso. La cantidad de aire adicional depende del tipo de combustible; para el caso de carbón el aire en exceso no debe superar el 20%, mientras que cuando se utiliza biomasa (bagazo, bagacillo, hojas) como combustible se emplea entre 30–35% más que la cantidad de aire estequiométrica determinada. De esta forma la relación aire:combustible se puede incrementar hasta un valor de 5.6 para el bagazo, sin considerar la humedad del combustible.

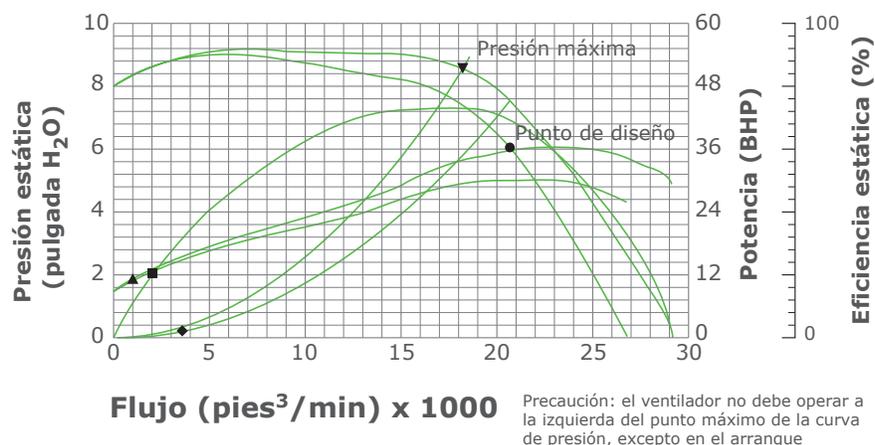
4. Una vez se determina la cantidad de combustible requerido, el valor se multiplica por la relación aire:combustible para encontrar la cantidad de aire necesario

$$\begin{aligned} \text{Cantidad de aire} &= (5.6 \text{ kg de aire / kg de bagazo}) * (37,880 \text{ kg de bagazo / hora}) \\ &= 212,128 \text{ kg aire/h} \end{aligned}$$

Este valor es necesario en el diseño (selección y control) del ventilador de tiro forzado. Usualmente se mide la presión de descarga del ventilador; con la curva de desempeño del ventilador se puede determinar la cantidad de aire que está siendo forzado a entrar a la caldera a una presión determinada. En la mayoría de las calderas existe algún tipo de regulador de aire ('dampers' o regulador de frecuencia del motor del ventilador) que actúa como mecanismo de control de la cantidad de aire enviado al hogar. La **figura 1.4** muestra la curva de desempeño de un ventilador, en la cual se indica la presión de operación sugerida (7.6 pulgadas de agua) para un flujo de aire de 21000 CFM.

Figura 1.4

Curva de desempeño de un ventilador en un ingenio



● Punto de diseño ◆ Curva del sistema ▼ Presión máxima ▲ Potencia vs. Vol. ■ E.S. vs. Vol.

Sugerencia: antes de continuar con el tema siguiente realice el ejercicio 1.2 (p.39)

Caracterización de los combustibles

Los combustibles, en especial los sólidos, se caracterizan de acuerdo con el tipo de análisis, así:

- 1. Composición química elemental:** indica el contenido porcentual de cada uno de los elementos químicos principales presentes en el combustible, entre ellos: carbono (C), hidrógeno (H), oxígeno (O) y nitrógeno (N); además de los contenidos de humedad (W) y cenizas (A), los cuales también son clasificados como elementos químicos principales. Esta composición química se denomina en base húmeda, aunque se puede expresar en base seca descontando la humedad del total de la muestra. En el **cuadro 1.1** se presenta la composición elemental típica en base seca de bagazo de caña obtenida por dos autores.

Cuadro 1.1

Análisis elemental de bagazo de caña de azúcar

Elemento	Porcentaje (%) según	
	Marie-Rose, <i>et al.</i> (2011)	Jenkins, <i>et al.</i> (1998)
C	48.0	48.6
H	6.0	5.9
O	42.0	42.8
N	—	0.2
S	—	0.04
Total	96.0	97.5

- 2. Composición técnica aproximada:** es la composición porcentual entre carbón volátil (indica el potencial de formación de productos en fase gaseosa), carbón fijo (refiere al potencial de formación de productos en fase sólida), humedad y cenizas del combustible por emplear. El **cuadro 1.2** muestra la composición técnica aproximada para bagazo de caña de azúcar.

Cuadro 1.2

Composición técnica aproximada de bagazo de caña de azúcar

Componente	Porcentaje (%) según	
	Marie-Rose, <i>et al.</i> (2011)	Jenkins, <i>et al.</i> (1998)
Volátiles	80.0	85.61
Carbón fijo	15.0	12.00
Cenizas	4.0	2.40
Total:	99.0	100.0

- 3. Poder calorífico:** es la cantidad de calor que se desprende de una unidad de masa del combustible durante la combustión completa. Este valor puede ser expresado como poder calorífico superior, en el cual se considera que el agua formada durante el proceso de combustión se condensa y por tanto se libera el calor latente. Este valor es mayor que el del poder calorífico inferior en el cual no se considera el fenómeno de condensación de agua formada durante la combustión. El poder calorífico está influenciado por la composición elemental y el contenido de cenizas del combustible; en el caso del bagazo, a mayor humedad y mayor contenido de cenizas, menor es el poder calorífico. Equipos como la bomba calorimétrica (**foto 1.2**) se utilizan en la determinación del poder calorífico superior de diferentes combustibles.

De otra parte, el carbón, un mineral de origen orgánico, presenta una composición aproximada que varía de acuerdo con su tipo. La ASTM (*American Society of Testing and Materials*) clasifica los carbones según el contenido de materia volátil, carbono fijo y poder calorífico (**Cuadro 1.3**). Para las clases de carbones sub-bituminoso y lignito, solamente se considera el valor del poder calorífico superior en base húmeda.

Foto 1.2

Bomba calorimétrica ICA –C2000



Cuadro 1.3

Clasificación de carbón según la ASTM D388-92

Clase	Carbono fijo (%)	Materia volátil (%)	Poder calorífico base húmeda (kJ/kg)
Antracita	98 – 92	14 – 2	—
Bituminoso	86 – 69	31 – 2	36,000 – 26,700
Sub-bituminoso	—	—	26,700 – 19,300
Lignito	—	—	19,300 – 14,650

- 4. Granulometría:** caracteriza la distribución de las partículas del combustible utilizado. Se determina por medio de tamices estandarizados; si un combustible presenta tamaños de partícula muy pequeños, se pueden producir arrastres hacia zonas no deseables, esto es fuera del hogar de la caldera, y ocasionar problemas de inquemados o combustión en zonas de recuperación de calor no preparadas para este efecto. El problema se puede solucionar con un diseño adecuado de los perfiles de velocidad en el hogar.

Cálculos del poder calorífico superior e inferior del bagazo

El poder calorífico del bagazo puede ser determinado a partir de los contenidos de sacarosa, humedad y cenizas. Diferentes autores han propuesto fórmulas de cálculo experimentales que involucran el análisis próximo. A continuación se presentan tres fórmulas (ecuaciones **1.2**, **1.3** y **1.4**) para estimar el poder calorífico superior (PCS) del bagazo con base en los porcentajes de humedad, cenizas y sacarosa del bagazo.

Según Lamb y Bilger (1976-1977):

$$PSC \text{ (kJ/kg)} = 199.5 (100 - 0.17 * s - w - z + 0.01 * z * w) \quad \text{Ecuación 1.2}$$

Según Don y Mellet (1977):

$$PSC \text{ (kJ/kg)} = 19605 - 196.05 * w - 31.14 * s - 196.05 * z \quad \text{Ecuación 1.3}$$

Según Cenicaña (2010):

$$PSC \text{ (kJ/kg)} = (21200 - (237 * w) - (222 * z) - (50.9 * s)) \quad \text{Ecuación 1.4}$$

donde,

s: sacarosa %bagazo

w: humedad %bagazo

z: ceniza %bagazo.

El poder calorífico inferior (PCI) puede ser determinado en forma aproximada a partir del poder calorífico superior, empleando la ecuación **1.5** (relación entre PCS y PCI)

$$PCI = PCS - 597G \quad \text{Ecuación 1.5}$$

donde,

PCI: poder calorífico inferior (kcal/kg de combustible)

PCS: poder calorífico superior (kcal/kg de combustible)

597: calor de condensación del agua a 0 °C (kcal/kg agua)

G: porcentaje (en peso) de agua formada por la combustión de H₂ más la humedad propia del combustible (kg/kg, agua/combustible). Este valor se calcula empleando la ecuación **1.6** (porcentaje de agua formada en la combustión)

$$G = 9H + H_2O \quad \text{Ecuación 1.6}$$

donde,

9: kilogramos de agua que se forman al oxidar 1 kg de hidrógeno

H: porcentaje de hidrógeno contenido en el combustible

H₂O: porcentaje de humedad del combustible.

Sugerencia: antes de continuar con el tema siguiente realice el ejercicio 1.3 (p.40)

Determinación de la eficiencia térmica de una caldera

La eficiencia térmica de una caldera se puede determinar en forma directa o indirecta. La forma directa relaciona la energía del vapor producido con la energía del combustible invertido en la producción de vapor. La ecuación **1.7** puede ser utilizada para calcular de forma directa la eficiencia térmica de una caldera por la relación entre la energía que sale y la energía que ingresa. En este método es necesario medir el caudal de combustible empleado por la caldera, lo que es aplicable, generalmente, a combustibles líquidos y gaseosos.

$$\eta = \frac{\text{Energía}_{\text{sale}}}{\text{Energía}_{\text{entra}}} \approx \frac{M_{\text{vapor}} * (H_{\text{vapor}} - H_{\text{agua}})}{M_{\text{comb}} * (PC_{\text{comb}})} \quad \text{Ecuación 1.7}$$

Método directo para eficiencia de calderas

donde,

M_{vapor} : flujo másico del vapor producido en la caldera (kg/s)

H_{vapor} : entalpía del vapor producido (kJ/kg)

H_{agua} : entalpía del agua de alimentación a la caldera (kJ/kg)

M_{comb} : flujo másico del combustible consumido (kg/s)

PC_{comb} : poder calorífico del combustible empleado (kJ/kg)

En la evaluación de la eficiencia de calderas por el método indirecto, o método de balance de energía, se utiliza la ecuación **1.8**. Este es un método de menor incertidumbre que el método directo y permite la identificación de las pérdidas energéticas más significativas.

$$\eta_{\text{caldera}} = 100\% - \sum \text{Pérdidas } \% \quad \text{Ecuación 1.8.}$$

Método indirecto para eficiencia de calderas

La sumatoria de pérdidas expresa los porcentajes de energía perdida, tomando como referencia la energía que entra en el combustible (bagazo, carbón, bagacillo o mezcla de los anteriores). En el método indirecto es necesario medir la composición de los gases de combustión para determinar las pérdidas de calor debidas al exceso de oxígeno y la formación de monóxido de carbono, entre otros. Las pérdidas que se consideran en la ecuación 1.8 se listan a continuación; la metodología para la determinación de cada una de ellas se explica en la unidad 2 de esta guía:

- Humedad por combustión o contenido de hidrógeno presente en el combustible.
- Humedad en el combustible o contenido de agua en el combustible.
- Calor en los gases secos: corresponde al calor sensible de los gases secos producto de la combustión que no es aprovechado y sale a la atmósfera.
- Inquemados: están relacionados con el calor que se deja de generar por la presencia de material combustible en los residuos de la combustión.

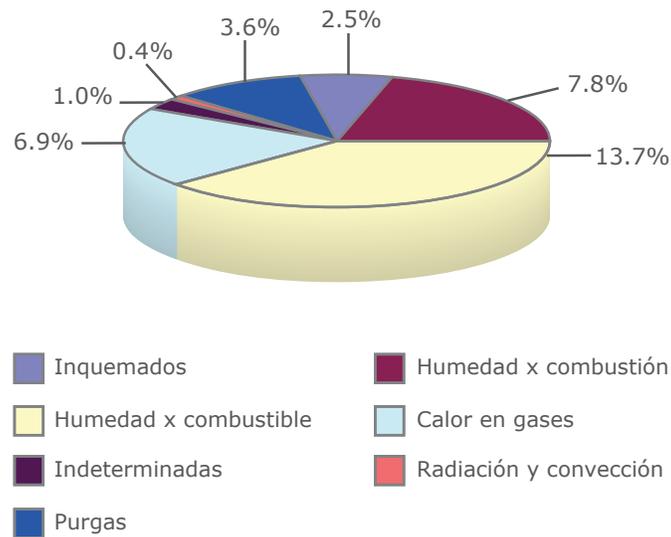
- Indeterminadas: como filtraciones de aire y fugas de vapor, entre otros.
- Pérdidas de calor en las purgas de vapor.
- Radiación y convección: pérdidas de calor con el medio ambiente externo.

En la **figura 1.5** se presenta la distribución típica de pérdidas de energía calculadas para una caldera de un ingenio colombiano que emplea bagazo como combustible. Las mayores pérdidas obedecen a la humedad proveniente del combustible (13.7%).

Figura 1.5

Pérdidas de energía en una caldera bagacera

Tomado de: Aguirre y Grimaldo, 2010



Sugerencia: para concluir la unidad 1 de aprendizaje, realice el ejercicio 1.4 (p.41)

Ejercicio 1.1. Operación de una caldera

Objetivos. Se espera que al finalizar el ejercicio cada participante tenga destreza para:

- Reconocer los componentes de mayor relevancia en la operación de una caldera en el ingenio donde trabaja.
- Identificar las principales variables de operación de la caldera.

Orientaciones para el facilitador

El facilitador puede ajustar las actividades según su criterio; el tiempo estimado para el desarrollo del ejercicio son 20 minutos.

Sugerencias para organizar el ejercicio:

- Es posible realizar este ejercicio en grupos o parejas, si los integrantes son de un mismo ingenio.
- Cada participante debe recibir las instrucciones para realizar el ejercicio: imprima el esquema de una caldera en una hoja de papel tamaño oficio y entregue una hoja en blanco para que el participante elabore su propio esquema. Se sugiere que cada grupo pueda disponer de lápices de colores para el ejercicio.
- Prepare con anticipación la logística del evento; asegúrese de tener disponible un salón adecuado para el trabajo de los grupos y ayudas para proyección de imágenes.

Orientaciones para la dinámica de retroinformación

Al terminar el ejercicio, el facilitador presenta el esquema completo de una caldera típica en un ingenio (figuras 1.1 y 1.2 de la unidad 1) y lo revisa con los participantes. Luego dirige la siguiente dinámica de retroinformación:

- Solicita a los participantes que compartan con el grupo las diferencias que encontraron entre el esquema propuesto y el esquema de la caldera del ingenio donde trabajan. Estas diferencias son importantes porque la eficiencia térmica de la caldera puede variar según la existencia o no de superficies de recuperación de calor, como son el economizador y el sobrecalentador.
- Les pregunta por la cantidad de 'X' que colocaron en el esquema de la caldera de su ingenio y destaca a quienes tuvieron el menor número de marcas por su interés en el desempeño de la caldera.

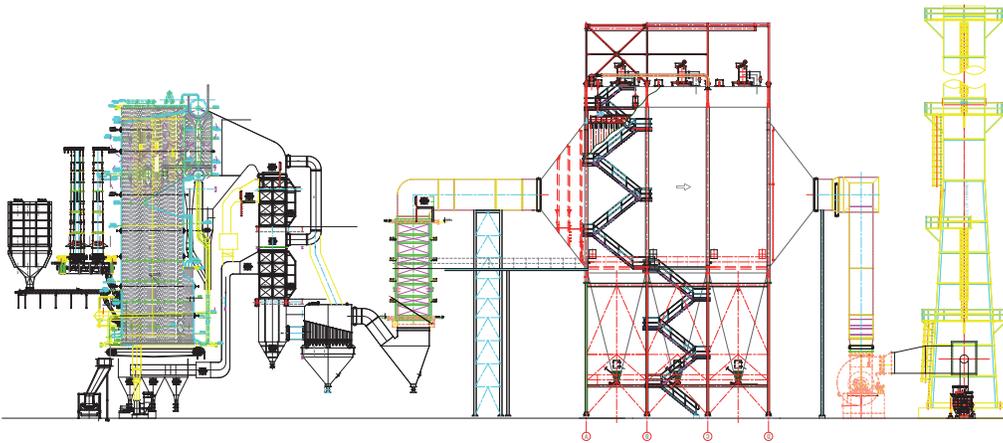
Instrucciones para los participantes

Ejercicio 1.1. Operación de una caldera

Trabaje en pareja o conforme un grupo con integrantes de su ingenio para llevar a cabo las tareas que se describen a continuación.

1 Identifique en el esquema de una caldera lo siguiente:

- Partes o secciones más importantes en la operación de la caldera
- Corrientes del proceso de combustión y generación de vapor
- Variables de mayor relevancia en la operación de la caldera



2 Dibuje un esquema de una caldera del ingenio donde trabaja:

- Utilice como referencia el esquema entregado por el facilitador.
- Identifique los componentes de la caldera, las corrientes y las variables de proceso
- Especifique las diferencias entre los dos esquemas.

3 Responda las preguntas siguientes:

En las condiciones de molienda (promedio) de su ingenio:

- ¿cuáles son los valores de cada una de las variables principales identificadas en el punto 2 anterior? Si desconoce el valor promedio de alguna variable márquela con 'X'.
- Contabilice el número de 'X' obtenidas y espere las orientaciones del facilitador para concluir el ejercicio.



Recurso digital

www.cenicana.org/pat

Ejercicio 1.2. Cantidad de aire utilizado en una caldera

Objetivo. Se espera que al finalizar el ejercicio los participantes tengan la capacidad para:

- Determinar la cantidad de aire que se debe suministrar a la caldera con el fin de lograr la combustión apropiada del bagazo en el hogar.

Orientaciones para el facilitador

1. Esta actividad se propone como un ejercicio extra-clase, en grupos por ingenio.
2. El grupo debe conseguir la información de operación de la caldera principal de su ingenio y llevarla a la próxima jornada del programa de capacitación:
 - tasa de molienda
 - consumo de bagazo
 - producción de vapor
 - presión de operación del ventilador de tiro forzado
 - curva de desempeño del ventilador.

Orientaciones para la dinámica de retroinformación. Con los datos de cada grupo el facilitador debe:

- Elaborar un cuadro comparativo y analizarlo con los participantes.
- Proponer alternativas para el control del aire en los ventiladores.
- Solicitar a los participantes que comparen las diferencias entre las presiones de operación real y las obtenidas con las curvas de desempeño del ventilador: ¿cómo es la distribución de aire en la caldera? ¿cuánto aire es primario y cuánto es secundario?

Instrucciones para los participantes

- 1 Conforme un grupo con los demás participantes de su ingenio y consigan la siguiente información de operación de la caldera principal del ingenio: tasa de molienda, consumo de bagazo, producción de vapor, presión de operación del ventilador de tiro forzado y curva de desempeño del ventilador.
- 2 Siga los pasos del ejercicio 1.1 anterior para determinar la cantidad de aire que requiere la caldera.
- 3 Ubique la curva de desempeño del ventilador de tiro forzado de la caldera y localice la presión de trabajo requerida para el flujo de aire calculado
 - ¿coincide con la presión típica de operación del ventilador de tiro forzado?



Recurso digital

www.cenicana.org/pat

Ejercicio 1.3. Cálculo del poder calorífico del bagazo

Objetivos. Mediante este ejercicio, los participantes estarán capacitados para realizar el cálculo aproximado del poder calorífico del bagazo empleado como combustible en una caldera de un ingenio y reconocer las propiedades que afectan el poder calorífico del combustible.

Orientaciones para el facilitador

1. Son necesarios 30 minutos para el ejercicio; los participantes trabajarán en grupos conformados por participantes del mismo ingenio y deben tener para el ejercicio: lápiz, papel y calculadora.
2. Se requiere información particular del bagazo empleado como combustible en el ingenio, por lo cual cada grupo debe conseguir con anticipación los datos siguientes: contenido de humedad, contenido de cenizas, contenido de sacarosa y análisis del PCS del bagazo o carbón realizado en el ingenio.

Orientaciones para la dinámica de retroinformación. El facilitador debe elaborar un cuadro comparativo con los datos obtenidos por los grupos para:

- Comparar el valor de poder calorífico superior obtenido para el bagazo versus el valor típico de otros combustibles, entre ellos, carbón, fueloil, madera, gas metano, hidrógeno (ver Anexo técnico 2)
- Comparar los valores calculados de PCS versus los valores medidos por el laboratorio del ingenio en muestras de bagazo y carbón, y responder a la pregunta: ¿cuál de las fórmulas se aproxima más a los valores de PCS del bagazo obtenidos en el laboratorio?

Instrucciones para los participantes

- 1 Conforme un grupo con los demás participantes de su ingenio y consigan la siguiente información acerca del bagazo empleado como combustible en el ingenio: contenido de humedad, contenido de cenizas, contenido de sacarosa y análisis del PCS del bagazo o carbón realizado en el ingenio.
- 2 Aplique las ecuaciones 1.2 a 1.5 (unidad 1) para calcular el poder calorífico superior del bagazo y determine el valor promedio estimado para el ingenio.
- 3 Repita los cálculos utilizando la mitad y el doble de los valores de humedad, sacarosa y contenido de cenizas y responda la pregunta: ¿cuál de estas tres variables tiene un efecto mayor sobre el poder calorífico calculado?
- 4 Aplicando las ecuaciones 1.5 y 1.6 (unidad 1) determine el valor promedio del poder calorífico inferior para un valor del 8% de contenido de hidrógeno en bagazo.



Recurso digital
www.cenicana.org/pat

Ejercicio 1.4. Elección del método para calcular la eficiencia de calderas bagaceras

Objetivo. Al finalizar este ejercicio, los participantes tendrán la capacidad para decidir cuándo se debe emplear el métodos directo y cuándo el método indirecto para realizar el cálculo de la eficiencia térmica de una caldera bagacera.

Orientaciones para el facilitador

1. Esta actividad se puede realizar en el salón donde se desarrolla la capacitación
2. Se requieren lápiz, papel y calculadora
3. El tiempo estimado para la actividad son 20 minutos.

Orientaciones para la dinámica de retroinformación. Para concluir esta actividad este ejercicio es necesario que el facilitador:

- Discuta con el grupo la solución más adecuada para resolver el problema planteado a los participantes en el ejercicio.
- Pregúnteles por la eficiencia térmica de la caldera y el método empleado para su determinación.
- Elabore un listado de las sugerencias propuestas para alcanzar el equilibrio en el consumo de bagazo y analicelas con el grupo.



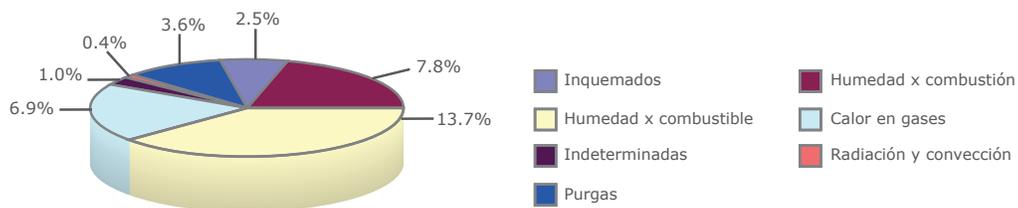
Instrucciones para los participantes

Ejercicio 1.4. Elección del método para calcular la eficiencia de calderas bagaceras

Los participantes deben resolver el problema que se presenta a continuación, señalando cuál método (directo o indirecto) emplearon en la solución.

1 Determine el consumo de combustible de la caldera en un ingenio con las condiciones siguientes:

- molienda: 320 toneladas de caña por hora, en promedio
- producción de vapor: 185,000 lb/h, a una presión de 400 psi y una temperatura de 410 °C
- agua alimentada a la caldera: a una temperatura de 170 °C
- poder calorífico superior del combustible (bagazo): estimado en 3750 BTU/lb
- producción de bagazo (%caña): 27%
- pérdidas estimadas de calor: como se resumen en la figura siguiente



2 Responda las preguntas:

- ¿el ingenio es autosuficiente en bagazo? ¿en cuáles condiciones?
- ¿cuál es la eficiencia de producción de vapor: relación vapor/bagazo?

3 Espere las orientaciones del facilitador para participar en la dinámica de retroinformación



Recurso digital

www.cenicana.org/pat



Chimeneas en calderas de un ingenio

Metodología para la evaluación de la eficiencia térmica de calderas

Introducción

El objetivo principal en esta segunda unidad es orientar al personal encargado de evaluar la eficiencia térmica de las calderas sobre las variables de la operación fabril que deben medirse sistemáticamente para la evaluación, el número de datos requeridos, los tiempos y las condiciones para ello. Se espera que el personal se concientice de la importancia de la toma de datos en forma correcta con el fin de garantizar la validez de los resultados de una prueba de este tipo.

Para alcanzar los objetivos anteriores se observará, a manera de introducción, la principal norma americana para la evaluación de eficiencia térmica de calderas y se revisará el protocolo sugerido por Cenicaña para la toma de datos en fábrica. Como complemento, en los Anexos técnicos 3 y 4 se presentan las principales normas de seguridad industrial que deben ser tenidas en cuenta durante la ejecución de la actividad, además de las definiciones de error, incertidumbre y precisión relacionadas con los datos tomados en fábrica.

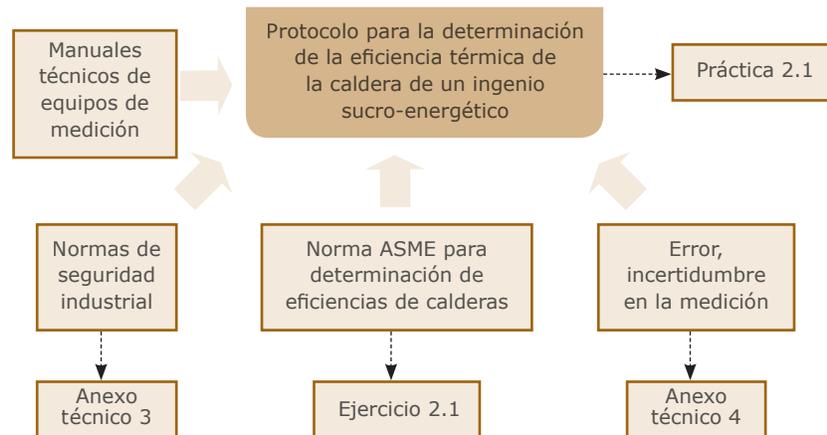
Objetivos

Esta unidad está orientada al desarrollo de las habilidades necesarias para la programación y supervisión de las tareas de evaluación de la eficiencia térmica de calderas, incluida la toma de datos en fábrica. Se espera que al finalizar las actividades, los participantes estén capacitados para:

- Explicar la forma cómo se deben tomar los datos experimentales en fábrica al personal encargado de esta labor
- Seguir en forma estricta los protocolos de manejo de equipos y métodos de muestreo para la toma de los datos necesarios para la evaluación
- Instruir al personal asignado para la toma de datos en fábrica sobre las variables de la operación fabril que deben medirse sistemáticamente para determinar la eficiencia térmica de las calderas, el número de datos requeridos, los tiempos y las condiciones que deben tener las variables, y sobre las normas de seguridad industrial en el medio de trabajo.

Estructura del aprendizaje

Evaluación de la eficiencia térmica de calderas



En la unidad 2 se desarrollará el protocolo de evaluación de la eficiencia térmica de calderas sugerido por Cenicaña para el sector sucro-energético. Inicialmente se revisan de los aspectos principales de la Norma ASME relacionados con dicha evaluación y se realiza el ejercicio 2.1. A continuación se presenta el protocolo de evaluación que acompaña la Práctica 2.1 relacionada con su aplicación. Como material anexo se presentan las normas de seguridad industrial en el desarrollo de la práctica y los temas de error e incertidumbre en la medición de variables. Se sugiere revisar los manuales de operación de los equipos portátiles requeridos para la evaluación.

Preguntas iniciales

Objetivo: estimular la participación y el interés del grupo en la materia de aprendizaje.

Orientaciones para el facilitador

Antes de comenzar el aprendizaje, el facilitador debe dirigir una serie de preguntas a los participantes con el objeto de estimular su participación e introducir el tema de evaluación de la eficiencia térmica de calderas que trata esta unidad.

1. ¿Cuál es la principal fuente de error en la medición de la eficiencia térmica de calderas?
2. ¿Qué tipos de gases se deben monitorear durante esta evaluación?
3. ¿Cuál es el tiempo mínimo estimado para la toma de datos durante la evaluación de la eficiencia térmica de una caldera?

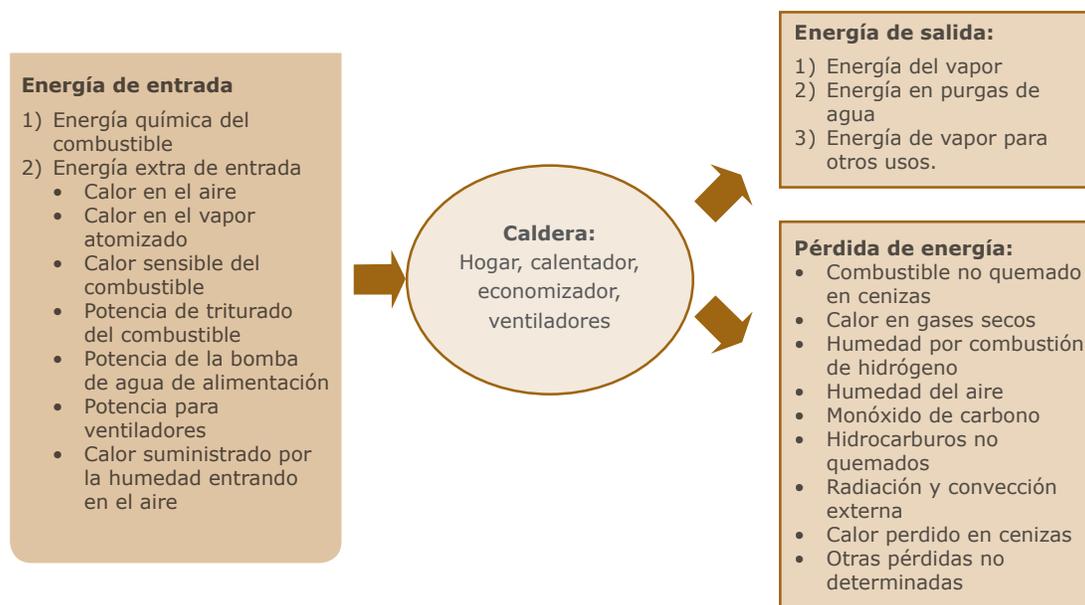
Norma ASME- PTC 4.1 para evaluación de la eficiencia de calderas

En 1946 la ASME (*American Society of Mechanical Engineers*) aprobó la norma PTC (*Power Test Codes*) 4.1, la cual trata principalmente de los métodos para determinar la eficiencia y la capacidad de unidades generadoras de vapor. En 2009 se publicó una revisión de la Norma, conocida como ASME PTC-4.0 2008, en la cual se presentan, entre otros temas, la metodología para calcular la eficiencia de calderas con base en el PCI del combustible. En esta norma se tratan los métodos directo o método entrada-salida, e indirecto o método del balance de energía, para determinar la eficiencia de una caldera, tal como se presentó en la unidad. Igualmente se proponen las ecuaciones de cálculo para determinar la eficiencia térmica de estas. En el Anexo técnico 4 se incluyen recomendaciones sobre el error admisible en el proceso de captura de los datos y la metodología de evaluación de calderas.

La metodología básica propuesta en la Norma consiste en la realización de un balance entre la energía total que entra al sistema termodinámico de la caldera y la energía que sale del sistema, incluidas las pérdidas. En la **figura 2.1** se presenta un esquema del balance propuesto. Al observar cada uno de los ítems de entrada y salida, es posible ver que la metodología planteada comprende la determinación de una eficiencia completa, que incluye las energías de accionamientos eléctricos y las pérdidas de calor por las cenizas cuando salen de la caldera.

Figura 2.1

Balance de energías de entrada y salida en una caldera (ASME – PTC 4.1)



Entre las principales recomendaciones de la Norma, se destacan:

1. Antes de realizar la evaluación se debe llevar a cabo una reunión entre las partes interesadas para acordar las condiciones de la evaluación.
2. Con anterioridad a la ejecución de la prueba, se deben revisar todos los equipos de medición y registro para asegurar su calibración y correcto funcionamiento.
3. Durante la ejecución de la evaluación se deben mantener las condiciones estables de operación de la caldera.
4. El tiempo mínimo de duración de la prueba debe ser de 4 horas.
5. La frecuencia máxima de toma de datos debe ser de 15 minutos, que puede ser menor de acuerdo con las condiciones de estabilidad de operación de la caldera.
6. Se sugiere realizar una curva de desempeño de la caldera con un mínimo de cuatro puntos de eficiencia, correspondientes a cuatro niveles de producción de vapor de la caldera.

Determinación de las pérdidas de energía

La norma ASME - PTC 4.1 muestra el balance de energía y las posibles pérdidas de ésta en el desempeño de una caldera (ver Figura 2.1). A continuación se presenta la metodología sugerida para calcular las principales pérdidas de energía, que son relevantes en el método indirecto de medición de la eficiencia térmica de la una caldera.

1. Pérdida por el agua formada a partir del hidrógeno presente en el combustible

$$P_{CH} = \left(\frac{(9H_2/100) * (H_g - H_a)}{PCS} \right) \quad \text{Ecuación 2.1}$$

donde,

- P_{CH} : porcentaje de pérdidas debidas a la formación de agua a partir del hidrógeno presente en el combustible
- H_2 : porcentaje en peso del hidrógeno del combustible
- $H_g - H_a$: diferencia entre las entalpías del vapor de agua a la temperatura de los gases de combustión y la entalpía del agua líquida a la temperatura de referencia (BTU/lb)

2. Pérdidas por humedad en el combustible

$$P_{HC} = \left(\frac{(%H/100) * (H_g - H_a)}{PCS} \right) \quad \text{Ecuación 2.2}$$

donde,

- P_{CH} : porcentaje de pérdida debido a la humedad del combustible
- $%H$: porcentaje en peso de la humedad del combustible.
- $H_g - H_a$: diferencia entre las entalpías del vapor de agua a la temperatura de los gases de combustión y la entalpía del agua líquida a la temperatura de referencia (BTU/lb)

3. Pérdidas por gases secos de chimenea

$$P_{GS} = \frac{M_{GS} C_p (T_G - T_A)}{PCS} \quad \text{Ecuación 2.3}$$

donde,

P_{GS} : porcentaje de pérdidas presente en los gases de chimenea

PCS : poder calorífico superior del combustible (BTU/Lb)

T_A : temperatura del aire de combustión o temperatura de referencia (°F)

T_G : temperatura de los gases de chimenea (°F)

C_p : calor específico de los gases de combustión, se tiene un valor de 0.24

M_{GS} : masa de gases secos por unidad de combustible (relación másica)

Para determinar la masa de gases secos la Norma ASME – PTC 4.1 tiene la expresión siguiente:

$$M_{GS} = \frac{11CO_2 + 8O_2 + 7(CO + N_2)}{3(CO_2 + CO)} * \left[\left[\frac{\%C}{100} - \frac{R * PC_R}{14500} \right] + \left[\frac{\%S}{267} \right] \right] \left[\frac{Lb}{Lb_{comb}} \right] \quad \text{Ecuación 2.4}$$

En la ecuación **2.4** anterior, CO_2 , O_2 , CO , N_2 son los porcentajes en volumen de los gases secos; $\%C$ y $\%S$ son los porcentajes en peso del carbono y del azufre en el análisis del combustible; R corresponde a la fracción en peso de los residuos de la combustión (lb/lb de combustible) y PC_R es el poder calorífico de los residuos (BTU/Lb)

$$R = \frac{\%C_{comb}}{100\% - \%C_R} \quad \text{Ecuación 2.5}$$

En la ecuación **2.5** anterior, $\%C_{comb}$ es el porcentaje de ceniza en el combustible y $\%C_R$ es el porcentaje de combustible en los residuos.

4. Pérdidas por inquemados de residuos

$$P_1 = \frac{M_{Cl}(PC_i)}{PCS} \quad \text{Ecuación 2.6}$$

donde,

M_{Cl} : masa de material combustible en los residuos

PC_i : poder calorífico del carbono (14500 BTU/lb)

P_1 : porcentaje de pérdida debido a la presencia de inquemados en los residuos.

Para calcular M_{Cl} en libras de material combustible por libra de combustible, se tiene la expresión siguiente:

$$M_{Cl} = \frac{A * B}{100(100 - B)} \quad \text{Ecuación 2.7}$$

donde,

- A: porcentaje en peso de las cenizas en el combustible (dato de análisis de laboratorio)
- B: porcentaje en peso de la masa de combustible en los residuos. Se estima a partir de la ecuación **2.8**

$$B = \left(0.21 * \frac{PC_{CP}}{PCS} \right) + \left(0.79 * \frac{PC_{CC}}{PCS} \right) \quad \text{Ecuación 2.8}$$

donde,

PC_{CP} : poder calorífico de los residuos de parrilla.

PC_{CC} : poder calorífico de los residuos de ciclones.

5. Pérdidas por radiación y convección

Esta pérdida cuantifica la cantidad de calor que se pierde desde las paredes de la caldera hacia el medio ambiente. Para este cálculo se puede utilizar la curva indicada por ABMA (*American Boiler Manufacturers Association*) que se presenta en la **Figura 2.2**. En ella se encuentran las pérdidas estimadas por radiación (eje vertical izquierdo) a partir de determinar la generación de la caldera en BTU/lb.

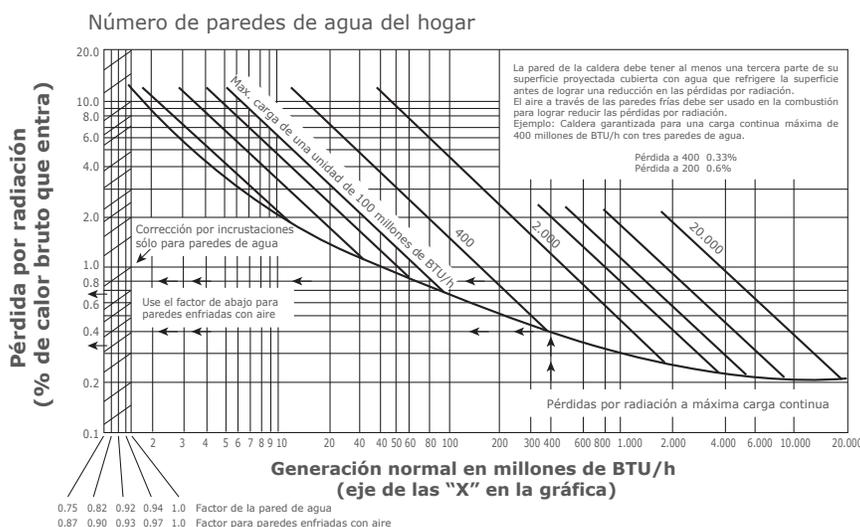
6. Pérdidas indeterminadas

Los fabricantes generalmente estiman las pérdidas indeterminadas como 1% o 1.5% de la energía entregada a la caldera. Este tipo de pérdidas no se consideran en la norma de referencia.

Figura 2.2

Curvas de pérdidas por radiación en una caldera

Norma ASME PTC- 4.1. (1991)



Los valores de pérdida por radiación obtenidos de esta curva corresponde a un diferencial de temperatura de 30° F entre la superficie y la temperatura ambiente y una velocidad de 100 pies por minuto sobre la superficie. Cualquier corrección para otras condiciones debe hacerse de acuerdo con la Figura 3, página 170, del *Manual of Standard of Refractory Materials* de 1957 (ASTM)

Sugerencia: antes de continuar con el tema siguiente realice el ejercicio 2.1 (p.55)

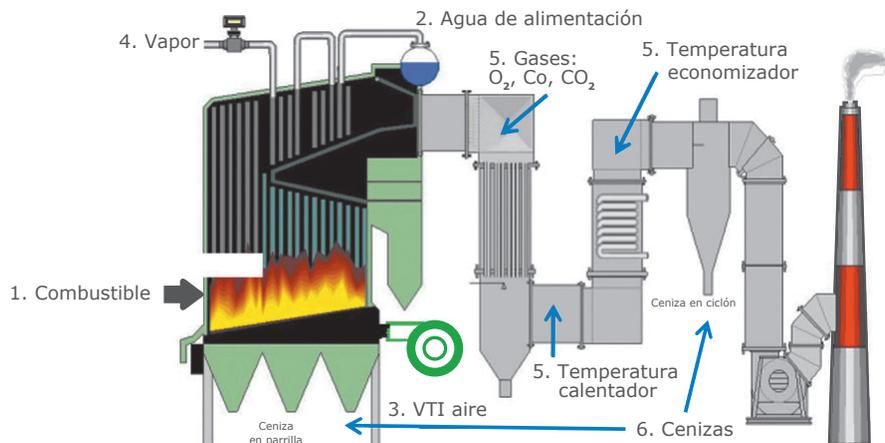
Protocolo sugerido por Cenicaña para evaluar la eficiencia térmica de calderas

Metodología

La metodología de evaluación de la eficiencia térmica de calderas, propuesta por Cenicaña, combina los métodos directo e indirecto presentados en la primera unidad de esta guía. Inicialmente, por el método indirecto se determina la eficiencia y posteriormente, empleando el método directo, se calcula el consumo de combustible, especialmente de bagazo; además se estima el exceso de aire empleado en la combustión. Lo anterior exige el registro de las variables anotadas para cada una de las corrientes de entrada presentadas en el **cuadro 2.1**. En la **figura 2.3** se presenta un esquema de una caldera donde se localizan los puntos de muestreo de cada una de las corrientes que aparecen en el mismo cuadro 2.1.

Figura 2.3

Puntos de medición de las corrientes de entrada y salida en la caldera



Medición de la composición de gases con equipo portable

El método indirecto en la metodología de evaluación de eficiencia en calderas exige conocer la composición de los gases de combustión (cuadro 2.1, ítem 5). Este análisis requiere la utilización de un equipo portátil para gases de combustión, debido a que, generalmente, las calderas no poseen el registro en línea de los principales gases (O₂, CO, CO₂, SO₂). En la **foto 2.1** se muestra un equipo típico para medición continua de la composición de gases de combustión.

Cuadro 2.1

Corrientes de entrada y de salida que deben ser monitoreadas para la evaluación de la eficiencia térmica de una caldera

Ítem	Corrientes de entrada	Punto de muestreo	Variable por registrar	Instrumento de medición	Ubicación del instrumento	Frecuencia de muestreo sugerida para 1 hora
1	Combustible: bagazo, bagacillo, carbón	Conductor de llegada a "Chutes" de alimentación	Humedad	Horno laboratorio	Laboratorio	Tomar cuatro (4) muestras de un (1) kilogramo, cada 15 minutos
			Poder calorífico superior	Bomba calorimétrica		
			% de cenizas	Horno laboratorio		
			Análisis elemental: %C, %H, %O, %N, %S	Análisis laboratorio		
			Caudal	Báscula	Conductor, bodega	
2	Agua de alimentación	Tubería de alimentación al domo superior	Caudal	Platina de orificio	Tubería de alimentación al domo superior	Cada 5 segundos
			Presión	Manómetro		Cada 5 segundos
			Temperatura de ingreso al domo	RTD		Valor de comprobación
3	Aire de entrada	Ducto de entrada de aire al calentador	Caudal	Tubo de pitot	Ducto de entrada de aire al calentador	Cada 5 segundos
			Presión	Manómetro		Cada 5 segundos
			Temperatura de entrada	RTD		Cada 5 segundos
Ítem	Corrientes de salida	Punto de muestreo	Variable por registrar	Instrumento de medición	Ubicación del instrumento	Frecuencia de muestreo sugerida para 1 hora
4	Vapor sobre-calentado	Tubería de salida del vapor	Caudal	Platina de orificio	Tubería de salida del vapor	Cada 5 segundos
			Presión	Manómetro		Cada 5 segundos
			Temperatura	RTD		Cada 5 segundos
5	Gases de combustión	Salida de gases desde cámara de combustión	Análisis de composición %O ₂ , %CO, %CO ₂ , %SO ₂	Analizador portable de gases	Salida de gases desde cámara de combustión	Tomar cuatro (4) muestras x espacio de 10 minutos cada una, con frecuencia de 5 segundos
			Temperatura de salida	RTD-Termocupla		Cada 5 segundos
		Salida del calentador	Temperatura de salida	RTD-Termocupla	Salida del calentador	Cada 5 segundos
		Salida economizador	Temperatura de salida	RTD-Termocupla	Salida economizador	Cada 5 segundos
			Caudal	Tubo de pitot		Valor de comprobación
6	Residuos de ciclón y de parrilla	Colectores de cenizas	Poder calorífico superior	Bomba calorimétrica	Laboratorio	Tomar cuatro (4) muestras de un (1) kilogramo, cada 15 minutos
			% de cenizas	Horno laboratorio		
7	Purgas de vapor	Tubería para purgas de vapor	Caudal	Platina de orificio	Tubería para purgas de vapor	Cada 5 segundos
			Temperatura	Termocupla		Cada 5 segundos

Foto 2.1

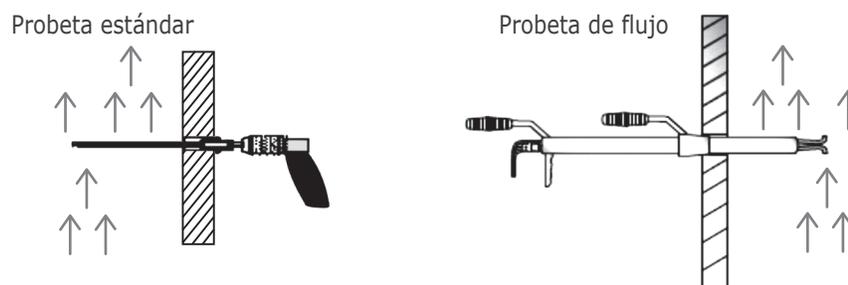
Equipo portátil para análisis de composición de gases (marca Lancom III)



Estos equipos, además de registrar la temperatura, cuentan con sensores individuales para la medición de la concentración de cada uno de los gases y están equipados con diferentes sondas para aplicaciones distintas (**figura 2.4**). Para medir la composición de los gases se utiliza la sonda estándar. El equipo tiene una bomba que succiona los gases, los cuales pasan a través de una trampa de agua y un filtro de partículas. La corriente de gases pasa luego a una cámara de expansión de donde se derivan dos corrientes, una que va hacia un filtro químico y llega a los sensores de CO y de hidrocarburos y otra que va hacia los sensores de los demás gases. La sonda de flujo mide la velocidad del fluido utilizando el principio del tubo de Pitot. Ambas sondas son instaladas de acuerdo con la dirección del flujo, como aparece en la figura 2.4 y no pueden ser utilizadas al mismo tiempo. La sonda de flujo requiere que el perfil de flujo esté desarrollado, es decir, que la velocidad del fluido se encuentre estabilizado, por lo que se emplea en secciones largas de ductos de tiro inducido y no a la salida de los gases del hogar de la caldera, donde se suele instalar la probeta estándar.

Figura 2.4

Sondas para análisis químico y flujo de gases



Sugerencia: revise el Protocolo de evaluación y luego realice la práctica 2.1 (p.56)

Protocolo de evaluación

A continuación se presentan los pasos del protocolo sugerido por Cenicaña para la medición de la eficiencia térmica de calderas en un ingenio.

Reunión de planeación. Como mínimo ocho días antes de la evaluación se sugiere realizar una reunión con todos los participantes con el fin de presentar y analizar las condiciones para la actividad. Para recolectar la información se puede emplear el formato del Anexo técnico 5.

1. En las condiciones de evaluación se deben definir el tipo o los tipos de combustible que se utilizarán durante la prueba. En caso de emplear mezclas, se debe establecer la proporción de cada combustible, por ejemplo, 80% de bagazo y 20% de carbón. Además, previamente se debe decidir el nivel de producción de vapor, el cual se mantendrá lo más estable posible durante el tiempo de ejecución de la evaluación.
2. La fecha y el tiempo estimados para cada prueba deben ser programados y definidos previamente. El tiempo mínimo de ejecución de una evaluación debe ser de 1 hora en condiciones estables. Si se desea evaluar otros escenarios como tipos de combustible, niveles de producción de vapor, y relación aire:combustible se requiere, como mínimo, 1 hora por cada escenario.
3. En 1 hora de evaluación la frecuencia de toma de datos en las variables monitoreadas por los instrumentos y sistemas de control de la caldera debe ser cada 5 segundos. En el **cuadro 2.2** se presentan las frecuencias sugeridas para todas las variables que se registren.

La persona responsable de cada actividad debe ser elegida antes de la ejecución de la evaluación y tendrá como funciones principales: (1) Verificación de los instrumentos, la fecha y resultado de la última calibración y la elaboración de un listado con la información recolectada. En caso de fallas debe elaborar un informe a los demás miembros involucrados con el objeto de definir un plan de acción. (2) Toma de muestras, para lo cual debe alistar bolsas plásticas para muestras de 1 kg de combustible, según la frecuencia programada de muestreo. Es necesario que la persona asignada reconozca el sitio de medición antes de la prueba. (3) Toma de muestras de residuos de parrilla y cenizas para lo cual es necesario alistar bolsas plásticas para muestras de 0.5 kg, según la frecuencia programada de muestreo. En este caso es igualmente necesario que la persona asignada reconozca el sitio de medición antes de la prueba. (4) Registro manual de variables que no son almacenadas por el sistema de control de la caldera, para ello debe definir cuáles son las variables que deben ser registradas en manuscrito y en qué formato se consignará la información. Lo aconsejable es que una variable sea registrada por una sola persona. También es necesario que la persona asignada reconozca el sitio de medición antes de la prueba y que conozca la forma para consignar los datos en el formato entregado (ver Anexo técnico 6). (5) Para la toma de datos de composición de gases se requiere un equipo portátil de medición y verificar que el punto de medición sea adecuado a la sonda del medidor. Este equipo también debe ser debidamente calibrado. (6) El sistema de control debe ser calibrado para el registro de variables en línea durante la prueba; se debe programar antes de la prueba el registro histórico de las variables suministradas por el sistema de control de la caldera y su frecuencia de almacenamiento. Esta información debe estar disponible en un archivo exportable a Excel® y será entregada a la persona encargada de recolectar la información una vez haya finalizado la prueba. (7) Es necesario definir el laboratorio para los análisis de las muestras de combustibles y residuos y solicitar que los envíen en forma oportuna. (8) La recolección de información debe ser centralizada

para facilitar su posterior procesamiento. La persona que lidera la actividad puede servir como recopilador de la información. (9) Definir la persona encargada del procesamiento y análisis de los datos e identificar los recursos requeridos para la labor.

Evaluación de la eficiencia térmica de la caldera. El día de ejecución de esta prueba se deben realizar las actividades siguientes:

1. **Reunión de apertura de la evaluación.** Antes de la prueba se debe informar a cada uno de los participantes las condiciones de ejecución de la evaluación, incluidas la hora de inicio y la hora de finalización. Verificar que las personas cumplan con las normas de seguridad industrial exigidas (ver Anexo técnico 3). Es pertinente aclarar que cualquier anomalía debe ser reportada.
2. **Desarrollo de las pruebas.** Durante la ejecución de la prueba se debe realizar un recorrido por cada uno de los puntos de medición de cada una de las corrientes anotadas en el Cuadro 2.1 y verificar el normal desarrollo de la actividad.
3. **Finalización de la evaluación.** Una vez finalizada la prueba se debe informar a cada uno de los participantes. A continuación se inicia el proceso de tabulación de la información recopilada la cual, posteriormente, se entregará a la persona designada para procesarla.

Cuadro 2.2

Frecuencia recomendada para toma de datos

Item	Corrientes de entrada	Variables por registrar	Frecuencia de muestreo sugerida para 1 hora
1	Combustible: bagazo, bagacillo, carbón	Humedad	Tomar cuatro muestras de 1 kg cada 15 minutos
		% de cenizas	
		Análisis elemental: %C, %H, %O, %N, %S	
		Caudal	Para comprobar
2	Agua de alimentación	Caudal	Cada 5 segundos
		Temperatura de ingreso al economizador	Cada 5 segundos
		Presión	Para comprobar
3	Aire de entrada	Temperatura antes de entrar al calentador	Cada 5 segundos
		Presión	Cada 5 segundos
		Caudal	Para comprobar
Item	Corrientes de salida	Variables por registrar	Frecuencia de muestreo sugerida para 1 hora
4	Vapor sobrecalentado	Caudal	Cada 5 segundos
		Presión	Cada 5 segundos
		Temperatura	Cada 5 segundos
5	Gases de combustión	Temperatura a la salida de tubos de recalentamiento de vapor	Cada 5 segundos
		Temperatura a la salida del economizador	Cada 5 segundos
		Temperatura de salida del calentador	Cada 5 segundos
		Análisis de composición: %O ₂ , %CO, %CO ₂ , %SO ₂	Tomar cuatro muestras por espacio de 10 minutos cada una, con frecuencia de 5 segundos
		Caudal	Para comprobar
6	Residuos de ciclón y parrilla	Poder calorífico superior	Tomar cuatro muestras de 1 kg cada 15 minutos
		% de cenizas	
7	Purgas de vapor	Caudal	Cada 5 segundos

Ejercicio 2.1. Norma ASME para la evaluación de la eficiencia de calderas

Objetivos. Al finalizar el ejercicio, los participantes estarán en capacidad de:

- Explicar a los operarios en fábrica la forma como deben tomar los datos experimentales.
- Seguir en forma estricta los protocolos de manejo de equipos y métodos de muestreo para la toma de datos durante la evaluación de la eficiencia térmica de la caldera.
- Instruir al personal asignado para la toma de datos en fábrica sobre la cantidad y tipo, los tiempos y las condiciones de las variables que deben ser monitoreadas con el fin de determinar la eficiencia térmica de la caldera.

Orientaciones para el facilitador

Esta actividad se puede realizar en el salón donde se desarrolla la capacitación, en grupos de tres participantes, quienes deben tener una calculadora, lápiz y papel.
Tiempo: 20 minutos.

Orientaciones para la dinámica de retroinformación:

- Presente las respuestas correctas y evalúe las de cada grupo (califique entre 1 y 5)
- Invite a cada grupo para que presente el esquema de balance térmico (pregunta 2)
- Destaque el grupo de mejor puntaje con una copia física de la norma ASME.

Instrucciones para los participantes

Siguiendo el contenido técnico de la unidad 2 de aprendizaje, los participantes deben:

- 1 Hacer un listado con los temas más importantes que trata la Norma ASME-PTC-4.1.
- 2 Tomando como referencia la figura 2.1 (unidad 1), diseñar un esquema que represente el balance de energía en la operación de la caldera. Incluir, además, los métodos directo e indirecto para la determinación de la eficiencia de una caldera.
- 3 De acuerdo con la norma ASME, enumerar los aspectos destacados en la evaluación de la eficiencia térmica de una caldera.
- 4 Explicar brevemente a que se refieren cada una de las pérdidas principales de energía para la aplicación del método indirecto de eficiencia térmica de una caldera.



Recurso digital

www.cenicana.org/pat

Práctica 2.1. Toma de datos en fábrica

Objetivos. Después de realizar esta práctica, los participantes estarán en capacidad de:

- Explicar en forma clara el procedimiento para la toma de datos experimentales en fábrica.
- Seguir en forma estricta los protocolos de manejo de equipos y métodos de muestreo para la toma de datos en fábrica durante la evaluación de la eficiencia térmica de calderas.
- Instruir al personal asignado para la toma de datos de campo en fábrica sobre la cantidad y tipo, los tiempos y las condiciones de las variables que deben ser monitoreadas con el fin de determinar la eficiencia térmica de la caldera.

Orientaciones para el facilitador

1. Se propone realizar este ejercicio en un ingenio elegido como piloto para la prueba, donde es recomendable contar con la instrumentación apropiada para monitorear las diferentes variables descritas en el Cuadro 2.1 de la unidad 2 de aprendizaje
2. El facilitador debe verificar la disponibilidad del ingenio y realizar una visita para conocer las instalaciones e identificar los puntos de medición
3. Preparar un listado de los participantes como base para definir la logística de transporte, alimentación, seguridad industrial y material de trabajo
4. Se deben preparar los formatos del protocolo de evaluación (Anexos técnicos 5 y 6)
5. Verifique la disponibilidad del equipo portátil analizador de gases (Lancom III) y la disposición del punto de medición en la caldera del ingenio piloto
6. La primera parte de la prueba, o sea la reunión de planeación, se puede realizar con anterioridad al día de la práctica, en el salón de la capacitación.



Analizador de gases portátil (Lancom III) instalado cerca del medidor continuo de nivel de oxígeno de la caldera de un ingenio suco-energético

Orientaciones para la dinámica de retroinformación

- Al finalizar la prueba se debe realizar una reunión para aclarar las dudas de los participantes.
- Después de leer los informes, se debe realizar un análisis o debate para aceptar o rechazar las sugerencias de los participantes sobre el protocolo inicialmente planteado.

Instrucciones para los participantes

Práctica 2.1. Toma de datos en fábrica

Empleando el protocolo sugerido por Cenicaña para la evaluación de la eficiencia térmica de calderas, los participantes deben asistir a la práctica de toma de datos en fábrica en la caldera de un ingenio piloto. Esto incluye:

1 Reunión de planeación y registro de información

- Asistir a la reunión de planeación y emplear el formato del Anexo técnico 5 para consignar la información de la reunión

2 Evaluación de la eficiencia de la caldera

- Ejecutar la evaluación y emplear los formatos del Anexo técnico 6 para el registro de datos

3 Datos del sistema de control

- Obtener una copia en archivo digital con los datos registrados en el sistema de control del ingenio (serán empleados en la unidad 3 de aprendizaje)

4 Informe de la evaluación o prueba de eficiencia

- Elaborar un informe sobre la ejecución de la prueba de toma de datos para la determinación de la eficiencia de la caldera

5 Propuestas de mejoramiento del protocolo de evaluación

- Presentar proposiciones para mejorar el protocolo sugerido por Cenicaña.



Recurso digital

www.cenicana.org/pat

Determinación de la eficiencia térmica de calderas: identificación de oportunidades de mejoramiento

Introducción

Una vez se han obtenido los datos y registros en la prueba de evaluación de la eficiencia térmica de una caldera, se debe proceder a su procesamiento y a la determinación analítica de dicha eficiencia. A partir de los resultados obtenidos, se deben analizar las oportunidades de mejoramiento en el desempeño de la caldera.

En esta unidad se tratarán estos temas, pero antes se hará una introducción a la estadística descriptiva y su aplicación en el procesamiento de datos. Seguidamente se analizarán las metodologías disponibles para calcular la eficiencia térmica de una caldera que han sido adoptadas por Cenicaña y la forma de empleo de las herramientas automatizadas para el cálculo de dicha eficiencia. Por último, se analizarán las causas principales de pérdida de eficiencia, de manera que a partir de los resultados obtenidos sea posible proponer estrategias para su mejoramiento.

Objetivos

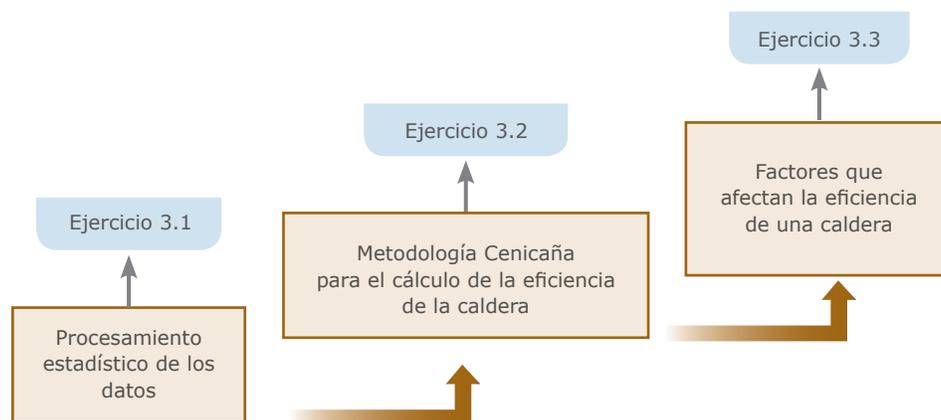
La unidad 3 está dirigida a fortalecer y desarrollar las habilidades necesarias para el cálculo analítico de la eficiencia térmica de calderas, empleando herramientas automatizadas.

Se espera que al finalizar las actividades de aprendizaje propuestas en esta unidad, el personal encargado de la gestión de la caldera esté en capacidad para:

- Calcular la eficiencia térmica de calderas mediante los métodos directo e indirecto a partir de los datos tomados en fábrica, empleando herramientas de cálculo bajo el ambiente del programa Excel®
- Determinar las causas de las bajas eficiencias térmicas de calderas.
- Proponer alternativas de solución para problemas que afectan el desempeño de su labor como encargado de la gestión de calderas.

Estructura del aprendizaje

Determinación de la eficiencia térmica de una caldera



La unidad 3 incluye la revisión de conceptos básicos para el procesamiento estadístico de los datos tomados durante la evaluación de la eficiencia térmica de la caldera (Práctica 2.1 de la unidad 2). Este tema es apoyado por el Ejercicio 3.1, en la cual se trabajan herramientas estadísticas del programa Excel®. El segundo tema es la metodología adoptada por Cenicaña para el cálculo de la eficiencia térmica de la caldera, desarrollado en el Ejercicio 3.2; incluye el uso de la herramienta de cómputo desarrollada por Cenicaña para el cálculo de la eficiencia y la determinación de las principales pérdidas de energía en las calderas. Finalmente, se trata el tema de las principales causas de pérdida de eficiencia térmica de una caldera en un ingenio del sector sucro-energético; en el Ejercicio 3.3 se aplican los conocimientos, motivando a los participantes para que propongan diferentes actividades encaminadas a la reducción de las pérdidas energéticas en una caldera.

Preguntas iniciales

Objetivo: estimular la participación y el interés del grupo en la materia de aprendizaje.

Orientaciones para el facilitador

1. En estadística ¿cuál es la diferencia entre la media y la moda en una serie de datos?
2. ¿Cuál es la mayor causa de pérdida de eficiencia térmica en las calderas de los ingenios sucro-energéticos?
3. ¿Conoce el nivel de referencia para el valor de eficiencia térmica en calderas de la industria sucro-energética?
4. ¿Cuál es la razón principal para medir la eficiencia térmica de una caldera en un ingenio sucro-energético?

Procesamiento estadístico de datos

Los datos e información recolectados mediante la prueba de evaluación de la eficiencia térmica de la caldera deben pasar por los procesos de selección, resumen y descripción. Este es el objetivo principal de la estadística descriptiva, en la cual se emplean diferentes estadígrafos o parámetros estadísticos como medidas de posición (media aritmética, moda, mediana), medidas de dispersión (varianza, desviación estándar, coeficiente de variación) y herramientas gráficas (histogramas, diagramas de barras, diagramas circulares de distribución) para el análisis e interpretación de datos. Algunos de los más importantes son los siguientes:

1. **Media aritmética.** Es un valor de tendencia central denominado valor promedio. Se define como la razón entre la suma de todos los datos y el número total de ellos. Es un valor sensible a cambios en los valores mínimo y máximo.
2. **Mediana.** Es el valor de tendencia central que separa el grupo de datos en dos partes iguales, es decir, una mitad de los datos están por encima y la otra mitad están por debajo de la mediana.
3. **Moda.** Es el valor de la serie de los datos que más se repite, es decir el de mayor frecuencia. Una serie de datos puede tener más de un valor de moda.
4. **Desviación estándar.** Es una medida de desviación de los datos que indica cuanto tienden a alejarse los valores puntuales de la media aritmética. Se define como el valor promedio de la distancia de cada punto a la media aritmética. Si el valor de la desviación estándar es grande, entonces los datos están muy alejados de la media aritmética y viceversa.
5. **Varianza.** Es una medida de desviación de los datos definida como la media aritmética de los cuadrados de las desviaciones estándar, por tanto es siempre un valor positivo. Al igual que la desviación estándar, su valor se incrementa cuando se presenta una mayor dispersión de los datos.
6. **Coeficiente de variación.** Es una medida de desviación relativa, expresada en términos porcentuales, lo que hace comparables las dispersiones de dos series de datos. Se define como el cociente entre la desviación estándar y la media aritmética.
7. **Histograma de frecuencias.** Es una herramienta gráfica que indica la frecuencia de sucesos para intervalos de datos de la serie. Esta herramienta muestra la tendencia del comportamiento de los datos, que puede ser centrada o sesgada.

Sugerencia: antes de continuar con el tema siguiente realice el ejercicio 3.1 (p.69)

Metodología propuesta por Cenicaña para calcular la eficiencia térmica de una caldera

Para calcular los valores de eficiencia térmica de una caldera en un ingenio sucro-energético, Cenicaña propone un método en el cual se parte de la determinación de la eficiencia por el método indirecto y posteriormente aplicando el método directo se calcula la cantidad consumida de combustible durante la prueba. En esta metodología se determinan la relación aire:combustible y el exceso de aire en la caldera. El procedimiento anterior se realiza en forma iterativa, debido a que la cantidad de combustible requerida es a su vez función de la energía entregada por el combustible. De esta manera se desarrolló en ambiente Excel® la aplicación EFICAL® sobre eficiencia de calderas. A continuación se presenta la metodología para el empleo de esta aplicación.

Datos de entrada

El punto de partida es el ejercicio 3.1 de la presente unidad, en el que se obtuvo como resultado un listado con los valores promedio, la moda, las desviaciones estándar y los coeficientes de variación de cada una de las variables registradas en la práctica 2.1 de la unidad anterior. Los valores promedio, o los valores más representativos de cada variable, deben ser ingresados en la tabla de **variables de entrada** (celdas de color azul) de la aplicación EFICAL® (**figura 3.1**); se ingresan los datos principales requeridos sobre la operación de la caldera, como son las condiciones del vapor, del agua y del combustible, la composición de los gases de combustión y los costos de cada combustible. En color rojo se muestran los valores de las cantidades estimadas de combustibles y la cantidad de aire en exceso, debido a que estos valores son estimados y recalculados cuando se corre la macro de la aplicación, es decir la rutina de procesamiento de los datos.

Procesamiento

Una vez ingresados los datos de entrada a la hoja de cálculo, se ejecuta la macro que los procesa para estimar el valor de eficiencia térmica de la caldera y las pérdidas de energía. Además, se comprueban los valores de consumo de combustible, los volúmenes de aire y las cantidad de agua empleada. Se da 'clic' sobre **calcular eficiencia** (figura 3.1)

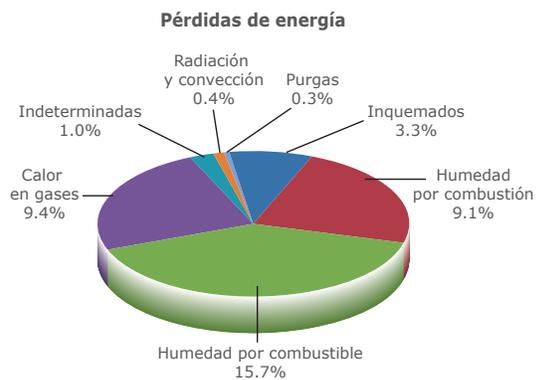
Resultados

A continuación del procesamiento de datos se colocan los resultados obtenidos por ambos métodos sobre la eficiencia de la caldera, la generación de vapor, el flujo de agua de alimentación y flujo de combustibles empleados. Al mismo tiempo se elabora una figura donde se presenta la distribución porcentual de las pérdidas de energía. Este tipo de figura permite distinguir las mayores causas de pérdidas de energía en la caldera, de manera que se generen acciones para incrementar su eficiencia térmica.

Figura 3.1

Hoja de datos de entrada y de salida para la aplicación EFICAL[®]

EFICAL [®] Cenicaña - Programa de Procesos de Fábrica			Calcular eficiencia		
Fecha:		Elaborado por:			
Ingenio:		Caldera:			
Variables de entrada			Variables de salida		
Ítem	Descripción	Valor	Ítem	Descripción	Valor
1	Molienda de caña (t caña/h)	33	1	Eficiencia Caldera (método indirecto) =	60.8%
2	Bagazo producido (%caña)	29	2	Eficiencia Caldera (método directo) =	75.9%
3	Periodo de evaluación caldera (horas) =	1.0	3	Bagazo calculado (t/h)	8.0
4	Bagazo estimado (t/h) =	8.0	4	Relación másica carbón/bagazo	0.0%
5	Residuos estimado (t/h) =	0.0	5	Relación másica residuo/bagazo	0.0%
6	Carbón estimado (t/h) =	0.0	6	Lb vapor / Lb bagazo equivalente =	2.19
7	PCS Bagazo Base húmeda (BTU/lb) =	3711	7	Relación aire/combustible=	4.7
8	PCS Residuos (BTU/lb) =	1	8	Contenido de O ₂ en gases (%)	8.4%
9	PCS Carbón (BTU/lb) =	1	9	Contenido de CO ₂ en gases (%)	12.0
10	PCS Inquemado Fly ash (BTU/lb) =	2612	10	Contenido de CO en gases (ppm)	850
11	PCS Inquemado Bottom Ash (BTU/lb) =	3244	11	Contenido de SO ₂ en gases (ppm)	0.4
12	Humedad del Bagazo (%) =	50.1%	12	Bagazo sobrante (t/h)=	1.6
13	Humedad del Residuo (%) =	35%	13	Flujo de agua de alimentación (lb/h)=	39423.0
14	Humedad del Carbón (%) =	10%	14	Costo del vapor (\$/lb) =	6.22
15	Contenido de cenizas del bagazo (% base seca) =	2.9%	15	Caudal de aire calculado (lb/h) =	81945.3
16	Contenido de cenizas del residuo (% base seca) =	9%			
17	Contenido de cenizas del carbón (% base seca) =	30%			
18	Contenido de azufre del bagazo (%) =	0.04			
19	Contenido de azufre del residuo (%) =	0.1			
20	Contenido de azufre del carbón (%) =	1.70%			
21	Contenido de materia volátil del carbón (%) =	35%			
22	Exceso de aire estimado (%) =	65%			
23	Contenido de O ₂ en gases (%)	8.4			
24	Contenido de CO ₂ en gases (%)	30.0			
25	Contenido de CO en gases (ppm)	2129.0			
26	Contenido de SO ₂ en gases (ppm)	7.1			
27	Temperatura del agua de purgas (°C) =	140.0			
28	Temperatura agua alimentación (°C) =	106.7			
29	Temperatura aire atmosférico (°C) =	30.0			
30	Temperatura gases Chimenea (°C) =	198.0			
31	Porcentaje de purgas @ vapor (%) =	2			
32	Presión del Vapor (psig) =	363			
33	Temperatura del Vapor (°C) =	493			
34	Generación de Vapor (lb/h) =	38650			
35	Costo del bagazo (\$/ton) =	30000			
36	Costo del residuo (\$/ton) =	20000			
37	Costo del carbón (\$/ton) =	80000			



Sugerencia: antes de continuar con el tema siguiente realice el ejercicio 3.2 (p.70)

Pérdida de eficiencia de calderas en un ingenio

La caldera es un equipo en el cual básicamente se transforma la energía química del combustible en energía térmica de vapor. Este proceso es una reacción química influenciada por la calidad de los reactantes (aire y combustible) y su mezcla y las condiciones del proceso como temperatura y tiempo. Las calderas del sector sucro-energético en su mayoría emplean biomasa, esto es bagazo entero o desmedulado, como sus principales combustibles. En algunos casos, se emplean combustibles de origen fósil, carbón principalmente, como fuente alterna de energía.

Los contenidos de humedad y cenizas son aspectos importantes en la determinación de la calidad de un combustible como el bagazo. En condiciones de operación nominales para un ingenio sucro-energético, el bagazo llega a la caldera con una humedad variable entre 45 y 50%, lo cual es una causa frecuente de pérdida de eficiencia energética, ya que esto obliga a gastar parte de la energía del combustible en evaporar el exceso de humedad. La estación de molienda es la encargada de mantener la humedad en el bagazo, por tanto, para mantener la eficiencia de la caldera es necesario controlar su desempeño. En la **foto 3.1** se muestra un medidor de humedad en línea, perteneciente a Cenicaña, sobre el conductor principal de bagazo que alimenta de combustible la caldera de un ingenio colombiano.

Una característica propia del bagazo es su contenido de cenizas, el cual en condiciones de lluvias puede alcanzar valores entre 18 y 20%, no obstante su valor típico se encuentra entre 5 y el 9%, en base seca. Este incremento de cenizas afecta el poder calorífico del combustible, ya que al ingresar a la caldera contiene mayor cantidad de material no apto para la reacción de combustión y la liberación de energía; además los materiales inorgánicos, especialmente sílice, tienden a incrementar el desgaste de las superficies de transferencia de calor e incrementar las labores de mantenimiento y reparación de equipos.

Foto 3.1

Medición en línea de la humedad del bagazo en el conductor que alimenta de combustible la caldera



En la **figura 3.2** se presenta un ejemplo de lo que ocurre en un ingenio colombiano con la tendencia de la eficiencia de una caldera frente a variaciones de las condiciones del combustible. Se observa que la relación entre la eficiencia y el poder calorífico es lineal y ascendente, es decir, que en la medida que se mejora la calidad del combustible, se mejora igualmente la eficiencia térmica de la caldera.

Sobre las condiciones de la reacción, se puede señalar que las cantidades de aire suministrado al hogar de la caldera superan, en la mayoría de los casos, los valores estándares esperados. Los niveles de oxígeno en los gases de combustión pocas veces se encuentran por debajo de 5%, debido a la condición de combustión en lecho fijo, que obliga a emplear niveles de excesos de aire por encima de 30%. En este aspecto juega un papel importante la instrumentación y el control del lazo de combustión para medir el nivel de oxígeno y el caudal de aire en los ventiladores, y ejercer acción sobre los puntos de salida de estos. Además se deben considerar las etapas de combustión del bagazo (ver figura 1.3 de la unidad 1) como guía en el control de los aires secundarios.

En la **figura 3.3** se presenta la relación proyectada entre la eficiencia de la misma caldera de la figura 3.2 y el nivel de oxígeno en gases de combustión. En este caso, se observa que el incremento en el nivel de oxígeno —que se interpreta como exceso de aire— afecta de manera negativa la eficiencia térmica calculada de la caldera. En general, se deben evitar las entradas no controladas de aire a la caldera, para evitar el descenso en la temperatura al interior del hogar.

Igualmente, si es necesario, controlar la distribución apropiada de los aires primario, secundario y terciario en el hogar de la caldera. Los niveles aceptados de composición de gases para una caldera que emplea bagazo como combustible son los siguientes: contenido (%) de $O_2 = 3-6$; contenido (ppm) de $CO = 50-200$; y contenido (%) de $CO_2 = 12-14$.

Figura 3.2

Relación entre eficiencia térmica de una caldera y el poder calorífico del combustible

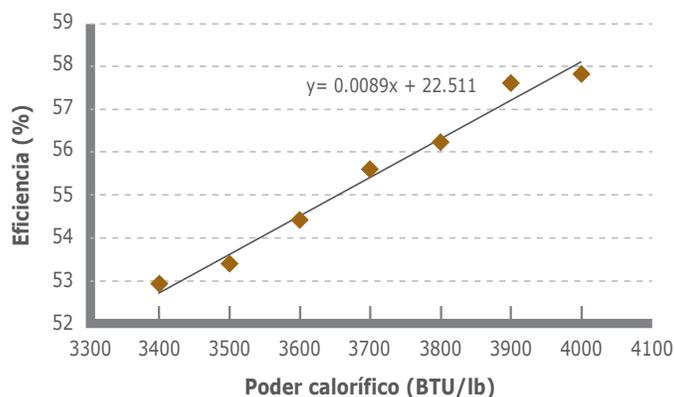
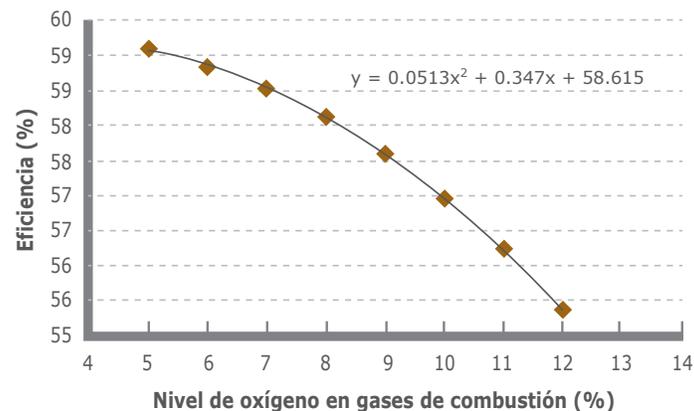


Figura 3.3

Relación entre la eficiencia térmica de la caldera y el nivel de oxígeno en gases de combustión



Cuando se emplea un combustible como carbón, se requiere una menor cantidad de aire en exceso, por tanto el nivel de oxígeno máximo aceptable es de 5%. Un nivel de CO por encima del recomendado (200 ppm) indica una mezcla aire:combustible deficiente al interior del hogar de la caldera, que a su vez incrementa las pérdidas energéticas.

La mezcla aire más combustible al interior del hogar puede ser modelada con el uso de herramientas computacionales de fluidos (CFD, por su sigla en inglés). En la **figura 3.4** se presenta el resultado comparativo de la aplicación de estas herramientas para observar los perfiles de velocidades de los gases al interior del hogar de una caldera en un ingenio, en un trabajo de modelamiento realizado por Cenicaña utilizando el software ANSYS®. Los resultados muestran la mejor configuración de aire secundario y terciario para evitar velocidades altas, esto es, por debajo de 5 m/s (escenario 2), a la vez que se obtiene un régimen turbulento de gases en la zona del hogar, favoreciendo la mezcla de aire más combustible.

Las condiciones de temperatura de los gases de combustión afectan igualmente la eficiencia de la caldera. La temperatura de salida no debe superar 160 °C, de lo contrario se estaría perdiendo calor aprovechable hacia la atmósfera, es decir, se incrementan las pérdidas por calor en gases secos. Si una caldera no posee superficies de recuperación, como calentadores de aire y economizadores, para incrementar la temperatura del agua de alimentación, la temperatura de salida de los gases de combustión se elevará, disminuyendo la eficiencia. Igualmente, si estas superficies no permanecen limpias, la eficiencia de transferencia de calor se verá afectada y por ende, la eficiencia térmica de la caldera.

En la **figura 3.5** se presentan diferentes escenarios para una misma caldera, considerando la eficiencia térmica en ausencia de las superficies principales de recuperación de calor. Se observa que las superficies de recuperación de calor, esto es calentador de aire y economizador, aportan, en promedio, 6.5% y 3.7%, respectivamente, a la eficiencia térmica de la caldera.

Otro factor de importancia es la presencia de material inquemado presente en los residuos de combustión. Este fenómeno es consecuencia de una combustión deficiente, por falta de aprovechamiento de la energía que entra con el combustible al hogar. Esta pérdida energética puede ser reducida con un manejo adecuado de los tiempos de residencia del material en el hogar, procurando la formación de un lecho o cama de un espesor uniforme y evitando la formación de cúmulos de combustible, tal como se presenta en la **foto 3.2**.

Figura 3.4

Modelo en CFD de los perfiles de gases al interior del hogar de una caldera de un ingenio colombiano

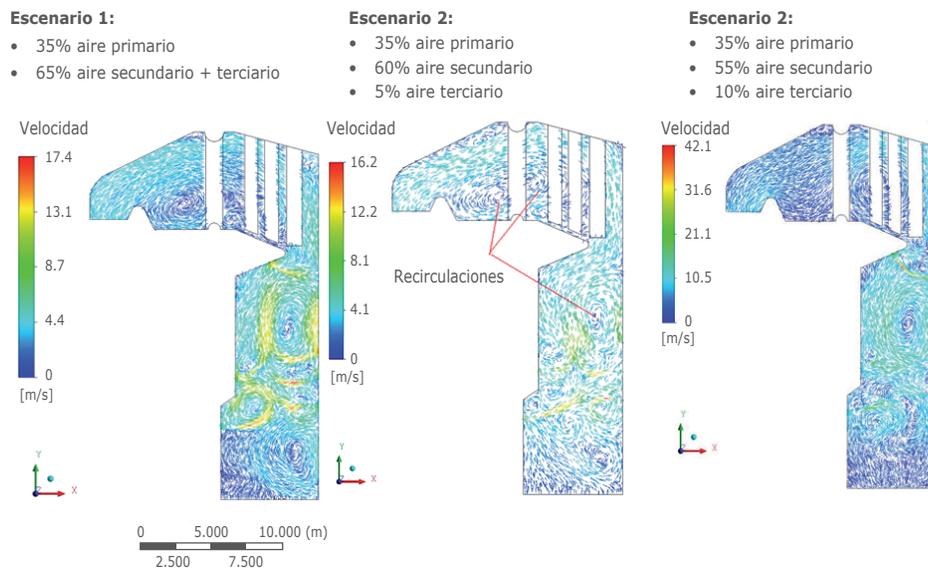


Figura 3.5

Eficiencia térmica de calderas en diferentes escenarios de superficies recuperadoras de calor

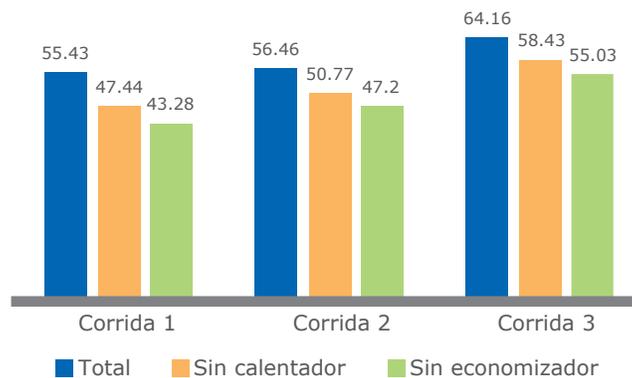


Foto 3.2

Parrilla con acumulación de combustible que incrementa la presencia de inquemados en los residuos de combustión y reduce la eficiencia de calderas



La calidad del agua es importante en la eficiencia de las calderas, ya que si sus propiedades favorecen la formación de depósitos y películas aislantes de SiO_2 en las superficies internas de los tubos, se disminuye la capacidad de transferir calor al agua, aumenta el consumo de combustible y se reduce la eficiencia en el desempeño de la caldera. Los principales problemas debidos al tratamiento no adecuado del agua (ver Anexo técnico 8) se resumen en:

- Incrustación o formación de depósitos duros de calcio, magnesio y silice en el interior de los tubos de la caldera, lo que disminuye la transferencia de calor hacia el agua, aumenta la demanda por combustible y reduce la vida útil del equipo por posibles rupturas de tubos.
- Corrosión por reacciones químicas entre dos elementos (pH , O_2 , CO_2) lo que ocasiona pérdida de material y la presencia de puntos propicios para rompimiento de tubos.
- Arrastre por presencia de sólidos disueltos y material orgánico que causa incrustaciones y afecta equipos como los turbos, que utilizan vapor.

Como resultado de la adición de compuestos químicos al agua de alimentación de calderas se forman sólidos en suspensión, que se concentran a medida que ésta cumple el ciclo de circulación, siendo necesario retirarlos mediante la purga de lodos o agua del fondo del domo. Esta purga se debe hacer aproximadamente una vez por turno y por un tiempo entre 0.5-1.0 minuto de acuerdo con el tratamiento y el análisis de laboratorio. En el domo de vapor se hace una purga continua para prevenir una acumulación de sólidos disueltos y mantener el control de químicos en el agua de la caldera (ciclos de concentración de la caldera). En esta operación se remueve continuamente una cantidad pequeña de agua del domo de vapor a través de la línea de desfogue continuo (aproximadamente 2%-5% del agua de alimentación)

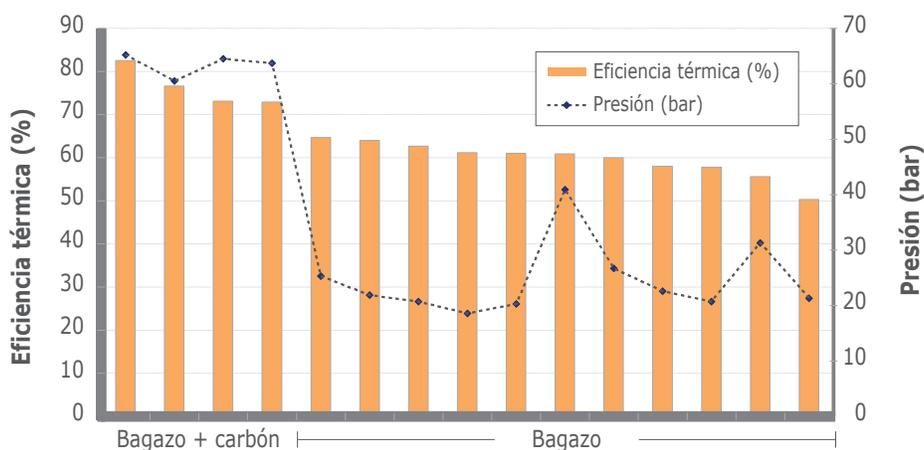
y se ajusta de acuerdo con los análisis de laboratorio. Este sistema debe ser controlado para evitar incrementos en las pérdidas energéticas por el calor que transporta el agua saliente de la caldera y económicas debido a la reposición del agua tratada. En términos energéticos, las pérdidas por purgas no deben superar 2% del combustible consumido.

En la **figura 3.6** aparece un resumen de algunas evaluaciones de calderas del sector sucro-energético colombiano, realizadas por Cenicaña el período 2007-2012. Las calderas que emplean solo bagazo alcanzan una eficiencia, promedio, de 60%, cuando el valor esperado es de 65%. Las calderas que emplean carbón y bagazo alcanzan una eficiencia, promedio, de 76%, debido al mayor poder calorífico del carbón. Las calderas de mayor eficiencia térmica son aquellas de mayor presión de vapor (mayor que 60 bar).

Como casos exitosos de evaluación de eficiencia de calderas por parte de ingenios sucro-energéticos colombianos y dentro del programa de auditorías energéticas al proceso de generación de vapor, se pueden mencionar: (1) en 2008 la caldera en un ingenio presentó una eficiencia térmica de 55%, con aire en exceso de 89% y un porcentaje de inquemados de 79%. Al año siguiente, después de realizar modificaciones al sistema de suministro y control de aire, la eficiencia incrementó hasta 60%, lo que permitió alcanzar el balance energético del ingenio, sin la utilización de combustibles adicionales al bagazo producido en el proceso de fábrica. (2) En 2012 un ingenio logró incrementar la eficiencia de su caldera desde 60.9% hasta 74%, disminuyendo el consumo de carbón en 2% como producto del mejoramiento de la combustión con contenidos de oxígeno desde 10.2% hasta 6.7% en gases de chimenea y control de la calidad del carbón empleado, lo que aumentó el poder calorífico en 32%.

Figura 3.6

Resumen de evaluaciones de eficiencias de calderas, realizadas por Cenicaña en ingenios colombianos



Sugerencia: para concluir la unidad 3 de aprendizaje, realice el ejercicio 3.3 (p.71)

Ejercicio 3.1. Uso de Excel® para el procesamiento estadístico de datos

Objetivo. Al finalizar el ejercicio los participantes estarán capacitados para emplear las herramientas y funciones estadísticas del programa Excel® en el procesamiento de datos.

Orientaciones para el facilitador

1. Para el ejercicio es necesario disponer de suficientes equipos con licencia de uso de Excel®, instalados en un espacio adecuado para trabajar en parejas. Se estima que son necesarios 45 minutos.
2. Los participantes deben tener los datos y la información recopilada en el ejercicio 2.1.
3. El facilitador puede seguir los pasos del Anexo técnico 7 para presentar la secuencia de cálculo ante los participantes.

Orientaciones para la dinámica de retroinformación

Solicite a los participantes que elaboren una lista con los valores más representativos de cada variable analizada, donde se distingan aquellas diferentes del valor promedio. Haga énfasis en la importancia del procesamiento estadístico de los datos.

Instrucciones para los participantes

Utilice el programa Excel® para tabular los datos recolectados en el ejercicio 2.1 y siga las indicaciones del facilitador (Anexo técnico 7). Para cada variable encuentre las medidas de dispersión siguientes:

- 1 El promedio, la mediana, la moda, la desviación estándar y la varianza. Calcule el coeficiente de variación. Con base en los resultados: ¿cuál de los valores de tendencia central se puede considerar más representativo de los datos?
- 2 Construya una gráfica de tendencia sobre ejes X - Y, colocando las unidades de tiempo en el eje X y los valores de la variable en el eje Y. Localice los valores de tendencia central determinados en el punto 1 anterior.
- 3 Seleccione el rango con datos apropiados y construya un histograma de frecuencias.
- 4 Siga las orientaciones del facilitador para participar en la dinámica de retroinformación.



Recurso digital
www.cenicana.org/pat

Ejercicio 3.2. Cálculo de la eficiencia térmica de calderas

Objetivo. Al finalizar este ejercicio, los participantes estarán capacitados para:

- Calcular la eficiencia térmica de una caldera mediante los métodos directo e indirecto a partir de los datos tomados en fábrica, empleando herramientas bajo ambiente Excel®
- Analizar los resultados del cálculo de la eficiencia térmica y determinar las principales pérdidas energéticas en calderas.

Orientaciones para el facilitador

1. Para el ejercicio es necesario disponer de suficientes computadores que tengan licencia de uso de Excel®, debidamente instalados en un espacio adecuado para trabajar en parejas. En cada computador se debe ejecutar la aplicación EFICAL® y verificar su funcionamiento. Se requieren 30 minutos para desarrollar el ejercicio.
2. Los participantes deben tener los datos y la información estadística obtenida en el ejercicio 3.1 anterior.

Orientaciones para la dinámica de retroinformación

Al finalizar el ejercicio, pídeles a los participantes que compartan los valores de eficiencia térmica obtenidos y que identifiquen las principales pérdidas energéticas; pregúnteles si se conocen valores de referencia para calderas similares (ver unidad 4 de aprendizaje) y motíuelos para que hagan propuestas de mejora de la aplicación EFICAL®

Instrucciones para los participantes

- 1 Ejecute la aplicación EFICAL® abriendo el archivo desde Excel®
- 2 Ingrese los valores promedio de las variables requeridas en la sección de datos de entrada. Estos valores fueron obtenidos en el ejercicio 3.1 anterior.
- 3 Determine la eficiencia térmica de la caldera y elabore un listado de las pérdidas energéticas con los valores más altos y con los más bajos.
- 4 Participe en la dinámica de retroinformación.



Recurso digital
www.cenicana.org/pat

Ejercicio 3.3. Cómo incrementar la eficiencia térmica de una caldera

Objetivo. Al finalizar este ejercicio, se espera que los participantes estén capacitados para:

- Proponer soluciones a problemas que afecten el desempeño de su labor como encargados de la gestión de calderas.

Orientaciones para el facilitador

Para el ejercicio es necesario disponer de suficientes computadores que tengan licencia de uso de Excel®, debidamente instalados en un espacio adecuado para trabajar en parejas. En cada computador se debe ejecutar la aplicación EFICAL® y verificar su funcionamiento. Se requieren 45 minutos para desarrollar el ejercicio. Los participantes deben tener los datos y la información estadística obtenida en el ejercicio 3.1 anterior.

Orientaciones para la dinámica de retroinformación

Motive a los participantes para elaborar un listado con las propuestas de algunos grupos acerca de las posibles estrategias para incrementar la eficiencia de calderas de acuerdo con los resultados obtenidos. Determinen si las estrategias propuestas son alcanzables y sugieran un plan de acción basado en las ideas comunes.

Instrucciones para los participantes

- 1 Utilice la aplicación EFICAL® para realizar diferentes evaluaciones de eficiencia térmica de una caldera, teniendo en cuenta:
 - poder calorífico superior del combustible, nivel de oxígeno en los gases de la caldera
 - temperatura de salida de los gases de combustión.
- 2 Con los resultados obtenidos, responda las preguntas:
 - ¿cómo varía la eficiencia de la caldera?
 - ¿cuál de los tres ítems produce un mayor cambio en el valor de eficiencia térmica?
- 3 Según los valores de pérdidas energéticas determinados en el ejercicio 3.2 anterior, formule algunas estrategias de incremento de la eficiencia energética de calderas.
- 4 Participe en la dinámica de retroinformación.



Recurso digital

www.cenicana.org/pat

Unidad 4

Acciones de control en el desempeño de calderas y sus repercusiones en el proceso

Introducción

En esta unidad se revisan los temas relevantes de control del desempeño de calderas y sus repercusiones en el proceso en fábrica; también se explican los principales lazos de control para una caldera y algunas experiencias de Cenicaña al respecto.

Adicionalmente se revisan los aspectos generales de la cogeneración en los ingenios sucro-energéticos colombianos, para finalizar con la explicación del Rendimiento Eléctrico Equivalente (REE) para los ingenios colombianos y relacionar este indicador con la eficiencia térmica de calderas.

Objetivos

En esta unidad se espera fortalecer y desarrollar las capacidades y habilidades de los participantes para la toma de las acciones necesarias en el control de los parámetros de operación involucrados en el mejoramiento de la eficiencia térmica de calderas. Al finalizar las actividades propuestas, los encargados de la gestión de calderas estarán en capacidad para:

- Identificar las consecuencias energéticas de la pérdida de eficiencia en una caldera, como responsabilidad prioritaria en su labor diaria
- Explicar las situaciones propias del proceso productivo que afectan el desempeño de la caldera.

Preguntas iniciales

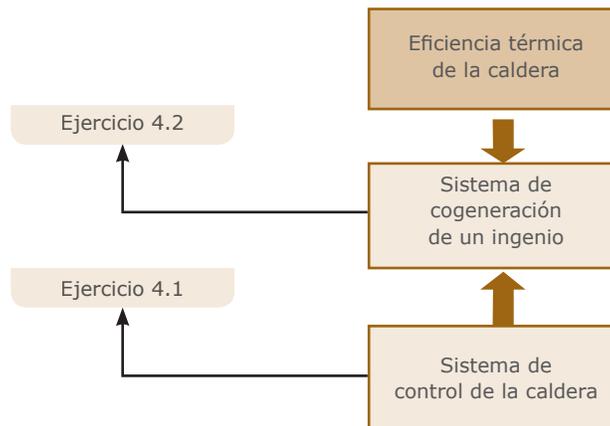
Objetivo: estimular la participación y el interés del grupo en la materia de aprendizaje.

Orientaciones para el facilitador

1. ¿Cuáles son los principales lazos de control en el desempeño de una caldera?
2. ¿Qué significa cogeneración?
3. ¿Qué es el REE?

Estructura de aprendizaje

Acciones de control en el desempeño de calderas



En esta unidad se observan los efectos del control adecuado de una caldera con una eficiencia térmica apropiada a sus condiciones de diseño, en el marco de operación de un ingenio con un esquema de cogeneración. Se tratan dos temas principales relacionados con la eficiencia térmica de calderas. El primero, es el sistema de control de la caldera en el cual se abordan, mediante el desarrollo del ejercicio 4.1, las principales estrategias de control de la caldera y su efecto en el desempeño de la misma. El segundo tema trata la cogeneración en ingenios sucro-energéticos, especialmente el papel que juega la eficiencia térmica de la caldera en el desempeño del sistema de cogeneración; este último aspecto se desarrollará en el ejercicio 4.2.

Sistema de control en calderas

A continuación se describen las estrategias de control convencional utilizadas en calderas a vapor de tipo industrial y se explican, en forma resumida, las aplicaciones de regulación automatizada más adecuadas en cada caso. Los sistemas de control en calderas responden a diferentes necesidades, entre ellas:

- Aumento de la eficiencia de la caldera, es decir, producir mayor cantidad de vapor utilizando menos combustible
- Reducción de pérdidas ya sean de agua, combustible o presión
- Reducción de los contaminantes producidos en la operación de la caldera
- Aumento de la seguridad en las instalaciones.

En los sistemas de control de calderas se exige un lazo cerrado de acción y reacción que funcione sin intervención del hombre, donde la realimentación es un elemento importante. En el caso de las calderas, los sistemas a controlar son de naturaleza dinámica, es decir, sus estados cambian entre un valor máximo y uno mínimo, por tanto la topología del lazo abierto no controla de manera efectiva este tipo de sistema y son preferibles los sistemas retro-alimentados. A continuación se tratan los principales lazos de control en una caldera.

Sistema de control del nivel de agua en el domo de vapor

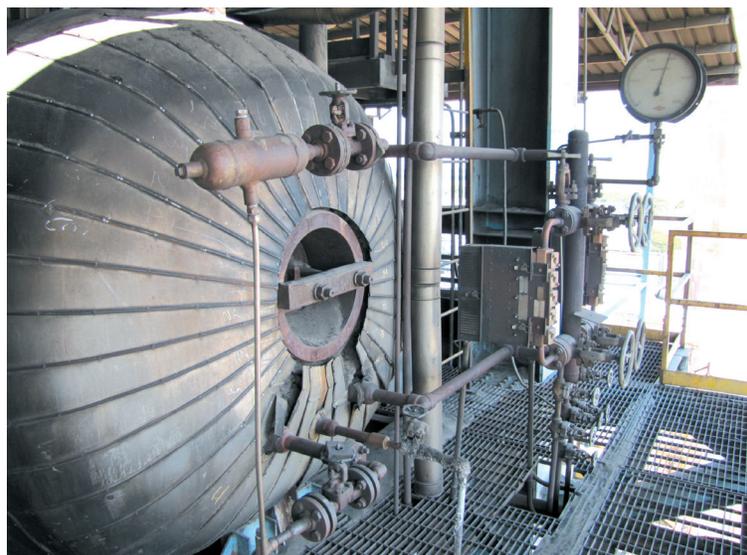
El sistema de control del nivel de agua en el domo de vapor (**foto 4.1**) es el primer lazo de una caldera (ver Anexo técnico 9). El control debe asumir los efectos del cambio volumétrico de las burbujas de vapor que permanecen en el líquido del domo superior, conforme cambia la demanda de vapor. Se debe contar con un sistema de medición directa del nivel para seguridad de la caldera.

El control del nivel del domo regula la alimentación de agua y puede ser realizado mediante: (1) control de nivel por un elemento, que puede ser el empleo de la señal de nivel del agua en el domo; (2) control de nivel por dos elementos, que utiliza la señal de flujo de vapor y de nivel de agua en el domo; (3) control de nivel por tres elementos, que emplean las señales de flujo de vapor, flujo de agua de alimentación y nivel de agua en el domo.

Para cargas por debajo de 30% del MCR (máxima tasa de producción continua de vapor) de la caldera se debe usar un elemento y para cargas superiores se deben usar tres elementos. Todas las variables que intervienen deben ser corregidas y se debe evitar que el domo se presurice por exceso de vapor o deficiencia de agua de alimentación, lo que puede causar un accidente.

Foto 4.1

Indicador del control de nivel en el domo superior de una caldera



Sistema de control de presión de vapor vivo

La presión de vapor vivo debe ser controlada con el fin de evitar accidentes por sobrepresiones en tuberías y equipos que utilizan vapor. La presión se controla, principalmente, regulando el suministro de combustible y aire y manteniendo la adecuada relación aire:combustible. Este lazo de control es el que tiene el mayor efecto sobre la eficiencia térmica de la caldera. La relación estequiometría aire:combustible permite calcular la demanda de aire y conectarse directamente con la señal de presión de vapor vivo para controlar la alimentación de ambos (combustible y aire) y realizar la respectiva corrección con la señal de oxígeno residual.

Sistema de control de presión de hogar

Es necesario garantizar el flujo de gases y la permanencia constante de la llama al interior del hogar de la caldera. También es necesario mantener la presión del hogar en un valor inferior a la presión atmosférica. La presión del hogar de la caldera se controla mediante la manipulación del flujo de aire por medio del posicionamiento del damper del ventilador de tiro inducido o variando la frecuencia de giro (r.p.m.) del motor, dependiendo de la señal entregada por el medidor de la presión en el interior del hogar. Es necesario mencionar que existen otros sistemas de control importantes, entre ellos, la calidad del agua que alimenta la caldera (dureza y pH), control del flujo de purgas y de la temperatura del vapor sobrecalentado, los cuales, de una u otra forma, afectan el desempeño de la caldera.

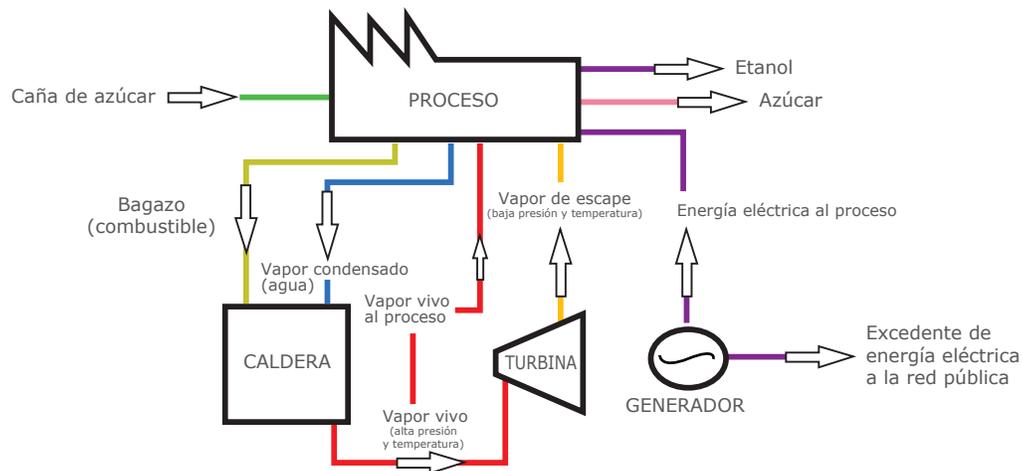
Sugerencia: antes de continuar con el tema siguiente realice el ejercicio 4.1 (p.78)

Cogeneración en ingenios sucro-energéticos

La cogeneración es una técnica de producción combinada de energía eléctrica y energía térmica la cual hace parte de la actividad productiva. Esta es una de las formas más eficiente de producción de energía eléctrica, debido al mayor aprovechamiento que se hace del calor proveniente de la corriente de energía térmica. En forma general los esquemas de cogeneración se pueden dividir en los tipos: (1) esquema de ciclo superior, el cual produce inicialmente energía eléctrica y posteriormente aprovecha el calor remanente de la corriente térmica en el proceso; y (2) de ciclo inferior en el cual se produce energía eléctrica después de haber empleado el calor requerido en el proceso, proveniente de la corriente de energía térmica. El esquema empleado en la industria azucarera colombiana es de ciclo superior (**figura 4.1**), en el cual se produce inicialmente vapor a altas presiones y temperaturas, para ser luego expandido en una turbina que genera energía eléctrica. El vapor que sale de la turbina a condiciones de menor presión y temperatura es llevado al proceso para que entregue su energía térmica remanente.

Figura 4.1

Esquema básico de cogeneración típico en un ingenio sucro-energético colombiano



Rendimiento eléctrico equivalente (REE)

La Comisión para la Regulación de Energía y Gas de Colombia (CREG) expidió la Resolución 162 del 2008 por medio de la cual establece la normativa para los proyectos de cogeneración nuevos y actuales en Colombia. En esta Resolución se adopta el indicador de Rendimiento Eléctrico Equivalente (REE) como parámetro de aceptación del proceso de cogeneración. El REE es un indicador empleado como medidor de la eficiencia de un proceso de cogeneración. Este se define como la razón entre la energía eléctrica total producida y la diferencia entre la energía primaria empleada para generar la energía eléctrica y el calor útil entregado al proceso después de haber generado dicha energía eléctrica, como se define en la ecuación 4.1 siguiente:

$$REE = \frac{EE}{EP - \frac{CU}{\eta_{REF}}} * 100 \quad \text{Ecuación 4.1}$$

donde,

REE: Rendimiento Eléctrico Equivalente.

EE: Producción total anual bruta de energía eléctrica en el proceso. Es un valor que se mide directamente en el generador (kW-h).

EP: Energía primaria del combustible consumida anualmente por el proceso. Es la energía entregada por el combustible. Se puede determinar como el producto del flujo másico de combustible (kg) entrando a la caldera por su poder calorífico inferior (kJ/kg)

CU: Producción total anual de calor útil del proceso. Es el calor que entrega la corriente de vapor de escape al proceso una vez se ha expandido en el turbogenerador. Puede ser calculado como el producto entre el flujo de vapor de escape requerido por el proceso (kg) y su calor latente de vaporización (calor liberado por el agua al cambiar de fase gaseosa a fase líquida, kJ/kg)

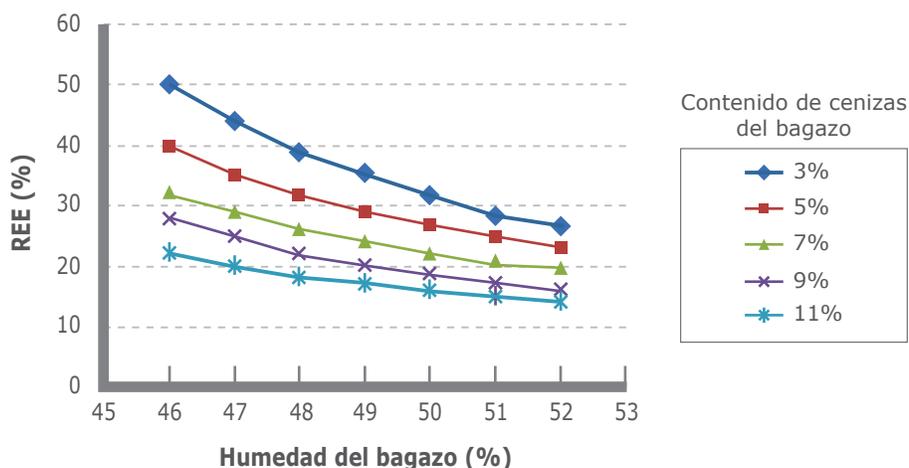
η_{REF} : Eficiencia de referencia para la producción de calor útil (0.9 establecido por la CREG para cualquier tipo de combustible)

La Resolución 005 de 2010 de la CREG estableció valores mínimos de REE, según el tipo de combustible empleado en el proceso, indicando un valor mínimo de 20% con combustibles como bagazo de caña. Posteriormente, por medio de la Resolución 047 de 2011 se reglamentó la ejecución de las auditorías respectivas a los cogeneradores, estableciendo para el sector sucro-energético un límite mínimo del 20% en eficiencia del REE para los proyectos no inscritos ante la UPME. Para los proyectos de cogeneración ya inscritos se acepta el valor mínimo entre el resultado del REE en la auditoría y el 20% reglamentado.

Para lograr mejorar este indicador y de esta forma el proceso de cogeneración en los ingenios colombianos, se requiere incrementar a su vez las eficiencias de los procesos de producción de energía eléctrica, la utilización de la energía primaria del combustible en las calderas y aumentar el aprovechamiento del calor útil remanente del vapor en el proceso, una vez ha salido de la turbina generadora de energía eléctrica. En la **figura 4.2** se presenta un análisis de sensibilidad del valor de REE versus las condiciones del combustible (bagazo) que llega a la caldera de un ingenio colombiano. Se observa que en la medida que disminuye la humedad y el contenido de cenizas del bagazo, incrementa el valor del REE.

Figura 4.2

Sensibilidad del REE ante condiciones diferentes del bagazo en un ingenio



Sugerencia: para concluir la unidad 4 de aprendizaje, realice el ejercicio 4.2 (p.79)

Ejercicio 4.1. Ajuste de controles

Objetivo. Al finalizar este ejercicio, los participantes estarán en capacidad de explicar los efectos de los sistemas de control en el desempeño de una caldera.

Orientaciones para el facilitador

Esta actividad se puede realizar en el sitio donde se desarrolla la capacitación, en grupos de tres participantes o en parejas, quienes deben tener una calculadora, lápiz y papel. El tiempo estimado son 20 minutos.

Orientaciones para la dinámica de retroinformación

Teniendo en cuenta la información suministrada por cada uno de los grupos de participantes, el facilitador dirige una reunión de discusión y análisis sobre la forma como se afecta el desempeño de una caldera debido a un control inapropiado.

Instrucciones para los participantes

1 Responda las preguntas que aparecen más abajo, considerando las siguientes situaciones como causas de las pérdidas de eficiencia energética en una caldera:

- Pérdidas por humedad del combustible
- Pérdidas por gases secos
- Pérdidas por inquemados.

Preguntas:

- ¿cuáles variables deberían ser controladas?
- ¿Qué lazo de control debería ser ajustado?

2 Participe en la dinámica de retroinformación.



Recurso digital

www.cenicana.org/pat

Ejercicio 4.2. Relación entre la eficiencia térmica de calderas y el REE

Objetivo. Al finalizar el ejercicio, los participantes estarán en capacidad de identificar las consecuencias energéticas y económicas de la pérdida de eficiencia en calderas para hacer de esta tarea una prioridad en su labor diaria.

Orientaciones para el facilitador

Para el ejercicio es necesario disponer de suficientes equipos con licencia de uso de Excel®, instalados en un espacio adecuado para trabajar en parejas. El facilitador entregará un archivo de Excel con los pasos para realizar el ejercicio. Se estima que son necesarios 30 minutos.

Orientaciones para la dinámica de retroinformación

¿Por qué es importante la eficiencia térmica de la caldera para un ingenio cogenerador de energía? Compare dos ingenios con y sin cogeneración y señale las similitudes y las diferencias.

Instrucciones para los participantes

En un ingenio donde:

- la molienda es de 120 toneladas de caña por hora en promedio
- se producen 150,000 lb de vapor/h, en promedio, a una presión de 400 psi y una temperatura de 410 °C
- el agua es alimentada a la caldera a una temperatura de 170 °C
- el poder calorífico superior del combustible (bagazo) se midió en 3750 BTU/lb
- el vapor se dirige a un turbogenerador cuyo 'steam rate' es de 8 kg de vapor/kW
- el calor útil medido equivale a 35,000 kW, aproximadamente

A partir de las ecuaciones de eficiencia de la caldera por método indirecto y la ecuación del cálculo del REE, y suponiendo que la generación de vapor se mantiene constante:

- 1 Realice los cálculos y elabore una gráfica de tendencia entre el valor del REE y la eficiencia térmica.
- 2 Según la gráfica ¿por encima de cual valor de eficiencia térmica de la caldera se alcanza el valor mínimo de REE, establecido por la CREG para ingenios cogeneradores?
- 3 Calcule la cantidad de bagazo producido con una relación de 30 (%caña) ¿a partir de cuál valor de eficiencia térmica se obtienen excedentes de bagazo?



Recurso digital
www.cenicana.org/pat

Contenido

Anexo técnico 1	
Cálculo estequiométrico de la cantidad de aire que se requiere en la combustión de biomasa	81
Anexo técnico 2	
Poder calorífico superior de diferentes sustancias	82
Anexo técnico 3	
Guías de seguridad industrial para la toma de datos en campo	83
Anexo técnico 4	
Error esperado en las diferentes variables para el cálculo de la eficiencia de la caldera (Norma ASME-PTC 4.1)	84
Anexo técnico 5	
Formato para la planeación de la prueba de evaluación de la eficiencia térmica de calderas	88
Anexo técnico 6	
Formato para registro manual de datos durante la evaluación de la eficiencia de calderas	90
Anexo técnico 7	
Guía de pasos en Excel® para procesamiento de datos	91
Anexo técnico 8	
Límites sugeridos por ASME para calidad de agua de alimentación a las calderas	95
Anexo técnico 9	
Principales esquemas de lazos de control para una caldera	96

Anexo técnico 1

Cálculo estequiométrico de la cantidad de aire que se requiere en la combustión de biomasa

Se calcula el balance estequiométrico de la reacción de combustión por elementos entre reactantes y productos, en condiciones de combustión completa, es decir, sin la presencia de CO en los productos. Las ecuaciones son las siguientes:

$$\text{Balance de carbón: } aX_1 = X_4$$

$$\text{Balance de hidrógeno: } bX_1 = 2X_5$$

$$\text{Balance de oxígeno: } cX_1 + 2X_2 = 2X_4 + X_5$$

$$\text{Balance de nitrógeno: } 3.76X_2 = X_7$$

Resolviendo el sistema, para el caso de bagazo los coeficientes a , b , c pueden tomar valores de 1, 1.7 y 1, por lo que las ecuaciones quedan:

$$\text{Balance de carbón: } X_1 = X_4$$

$$\text{Balance de hidrógeno: } 1.7X_1 = 2X_5$$

$$\text{Balance de oxígeno: } X_1 + 2X_2 = 2X_4 + X_5$$

$$\text{Balance de nitrógeno: } 3.76X_2 = X_7$$

Como el número de incógnitas es mayor que el número de ecuaciones, se deben suponer valores para $X_1 = 1$, con lo cual $X_4 = 1$ y $X_5 = (1.7)/2 = 0.85$. Despejando X_2 de la ecuación de balance de oxígeno se tiene que $X_2 = ((2 * X_4 + X_5) - X_1)/2 = 0.925$. Esta solución está expresada en términos volumétricos. Para encontrar la relación de aire:combustible se debe multiplicar por el peso molecular de cada uno de los productos y reactantes. Para la biomasa se calcula 29.7 g/g-mol y para el aire se calcula 137.28 g/g-mol, con cual se obtiene una relación estequiométrica de la forma:

$$\text{Relación aire:combustible} = (X_2 * \text{g/g-mol aire}) / (X_1 * \text{g/g-mol de biomasa}) = 4.276$$

Anexo técnico 2

Poder calorífico superior de diferentes sustancias

(Tomado de: <http://cadascu.wordpress.com/2011/05/25/poder-calorifico-de-las-sustancias-mas-comunes/>)

Tabla de poderes caloríficos de diferentes materiales

Maderas y residuos agrícolas	PCS (kJ/kg)	PCS (BTU/lb)	PCS (kJ/kg)	PCS (BTU/lb)
Bagazo húmedo	10500	4515	-	-
Bagazo seco	19200	8257	-	-
Madera seca	19000	8171	-	-
Madera verde	14400	6193	-	-
Cáscara de arroz	15300	6580	-	-
Cáscara de trigo	15800	6795	-	-

Carbón y otros combustibles sólidos	PCS (kJ/kg)	PCS (BTU/lb)	PCI (kJ/kg)	PCI (BTU/lb)
Lignito	29600	12729	28400	12213
Hulla	31400	13503	30600	13159
Antracita	34700	14923	34300	14751
Carbón de madera	31400	13503	33700	14492
Coque	29300	12600	33700	14492

Combustibles líquidos	PCS (kJ/kg)	PCS (BTU/lb)	PCI (kJ/kg)	PCI (BTU/lb)
Alcohol comercial	26750	11504	23860	10261
Etanol puro	29720	12781	26790	11521
Metanol	-	-	19250	8278
Fueloil N°1	42695	18361	40600	17460
Fueloil N°2	41860	18002	39765	17101
Gasóleo	43115	18541	42275	18180
Gasolina	46885	20163	43950	18900
Petróleo bruto	47970	20629	40895	17587
Queroseno	46500	19997	43400	18664

Combustibles gaseosos	PCS (kJ/kg)	PCS (BTU/lb)	PCI (kJ/kg)	PCI (BTU/lb)
Gas natural	44000	18922	39900	17159
Hidrógeno	141853	61003	120011	51610
Propano	50450	21696	46350	19933
Butano	49675	21362	45790	19692

Anexo técnico 3

Guías de seguridad industrial para la toma de datos en campo

En la realización de una actividad que involucre la presencia del personal en las instalaciones de producción del ingenio, se debe:

1. Verificar la documentación requerida por las normas de seguridad industrial del ingenio, tales como afiliación al sistema de riesgos profesionales, sistema de salud, certificación de asistencia a capacitación de seguridad industrial del ingenio, entre otras.
2. Verificar la protección requerida por el personal, incluidos: casco de protección, gafas, protección auditiva, guantes para trabajo en caliente, ropa y zapatos apropiados para el trabajo, mascarilla de protección contra partículas.
3. Señalar la ruta de evacuación en caso de emergencia y especifique la zona de encuentro.
4. En los puntos de registro de datos manual o recolección de muestras de combustible y residuos, se deben identificar los elementos que puedan causar quemaduras por contacto y advertirle al operario del riesgo.
5. En el caso de análisis de gases con equipo portable, se debe advertir a la persona los riesgos de inhalar gases de combustión. Es imprescindible que la persona que realiza la actividad porte la mascarilla de protección adecuada.

Anexo técnico 4

Error esperado en las diferentes variables para el cálculo de la eficiencia de la caldera (Norma ASME-PTC 4.1)

La determinación de la eficiencia térmica de una caldera es un proceso que involucra la medición y la toma de datos en campo. Medir es un proceso de comparación entre la magnitud considerada como patrón y aquella que se desea conocer. Este proceso de comparación no es perfecto, esta sujeto a diferentes tipos de errores, los cuales deben ser reportados con el fin de conocer la calidad del dato finalmente obtenido. Los tipos de errores se pueden clasificar en:

Aleatorios. Son originados por variaciones impredecibles de diferentes magnitudes de influencia, aparecen al azar y escapan del control del observador. No se pueden corregir pero sí reducir incrementando el número de observaciones.

Sistemáticos. Son el componente del error total que permanece más o menos constante a lo largo de una serie de mediciones del mismo mensurado. Son independientes del número de mediciones, pero se pueden corregir si se conoce su efecto sobre el resultado de la medición. El error sistemático puede ser debido al sesgo instrumental, errores humanos, diseño pobre de investigación o presunciones erradas sobre el comportamiento de las variables en un sistema.

Errores en la toma de datos para la determinación de la eficiencia de calderas

Al considerar las diferentes variables de operación de una caldera se debe considerar el error a causa de medidas directas suministrado por cada uno de los instrumentos de medición para cada variable medida. En el caso del método directo para determinación de la eficiencia térmica de calderas, se debe conocer la precisión de los medidores de:

- Flujo de vapor vivo
- Temperatura de vapor vivo
- Presión de vapor vivo
- Temperatura de agua de alimentación de caldera
- Presión de agua de alimentación a caldera
- Flujo de combustible a la caldera
- Poder calorífico superior del combustible.

Las variables anteriores corresponden en su mayoría a datos obtenidos con instrumentos instalados en la caldera y cuya calibración se realiza en forma constante por parte del personal técnico del ingenio. Sin embargo, se recomienda antes de realizar una evaluación de eficiencia térmica, confirmar el control de los instrumentos (fecha y resultados de la última calibración). Para el caso del método indirecto se debe conocer la precisión del medidor de los diferentes parámetros requeridos para el cálculo de la eficiencia térmica, entre estos:

- Concentración de gases de chimenea (oxígeno, dióxido de carbono, monóxido de carbono, hidrógeno, nitrógeno, azufre)
- Análisis elemental del combustible (carbono, hidrógeno, nitrógeno, azufre)
- Poder calorífico de combustible e inquemados
- Contenido de cenizas en combustible e inquemados
- Humedad del combustible
- Temperatura de aire de entrada al hogar de la caldera
- Temperatura de salida de los gases de chimenea.

En este caso de método indirecto la composición de gases se mide con equipos portátiles para análisis. En el caso del método directo se debe revisar, igualmente, que, el control del instrumento portátil considerando fecha y resultado de la última calibración.

Es necesario aclarar que el resultado del cálculo de la eficiencia térmica de la caldera, que es una medida indirecta, es afectado por la precisión de cada una de las medidas directas. En el caso de emplear la fórmula del método directo, una manera para calcular el error es la aplicación de la Ecuación siguiente:

$$\Delta\eta_{directo} = \left| \frac{\partial M_{vapor}}{\partial \eta} \right| \Delta M_{vapor} + \left| \frac{\partial H_{vapor}}{\partial \eta} \right| \Delta H_{vapor} + \left| \frac{\partial H_{agua}}{\partial \eta} \right| \Delta H_{agua} + \left| \frac{\partial M_{comb}}{\partial \eta} \right| \Delta M_{comb} + \left| \frac{\partial PCS_{comb}}{\partial \eta} \right| \Delta PCS_{comb}$$

donde,

$$\left| \frac{\partial M_{vapor}}{\partial \eta} \right| ; \left| \frac{\partial H_{vapor}}{\partial \eta} \right| ; \left| \frac{\partial H_{agua}}{\partial \eta} \right| ; \left| \frac{\partial M_{comb}}{\partial \eta} \right| ; \left| \frac{\partial PCS_{comb}}{\partial \eta} \right|$$

son los aportes de cada una de las variables (flujo de vapor, entalpía del vapor, entalpía del agua, flujo de combustible, poder calorífico superior del combustible) a la incertidumbre de la eficiencia térmica.

$$\Delta M_{vapor} ; \Delta H_{vapor} ; \Delta H_{agua} ; \Delta M_{comb} ; \Delta PCS_{comb}$$

es la incertidumbre de cada una de las variables.

Ejemplo. Determinación del error en la medición de entalpía del vapor vivo

En este caso se propone determinar la incertidumbre en la estimación del valor de la entalpía de vapor vivo para una caldera que mide la temperatura del mismo, con un valor medio de 500 °C y un instrumento que le entrega una precisión de ± 5 °C. La presión del vapor vivo se monitorea en un valor medio de 60 bar, empleando un instrumento con una incertidumbre en la medida directa de ± 2 bar.

1. La determinación de la entalpía de un flujo es una medida indirecta, la cual depende de las mediciones directas de temperatura y presión. Por tanto, para calcular la incertidumbre de la entalpía se puede emplear la siguiente ecuación (incertidumbre de la entalpía del vapor):

$$\Delta H_{\text{vapor}} = \left| \frac{\partial T}{\partial H} \right| \Delta T + \left| \frac{\partial P}{\partial H} \right| \Delta P$$

2. Para determinar el aporte de la temperatura y la presión a la incertidumbre de la entalpía, se puede realizar un ejercicio consistente en encontrar el valor de entalpía para los valores máximo y mínimos de una variable, mientras que la otra permanece constante:

- a. Para $\left| \frac{\partial T}{\partial H} \right| = H(505, 60) - H(495, 60) = 3435 \text{ kJ/kg} - 3411 \text{ kJ/kg} = 23 \text{ kJ/kg}$.

- b. Para $\left| \frac{\partial P}{\partial H} \right| = H(500, 62) - H(500, 48) = 3420 \text{ kJ/kg} - 3425 \text{ kJ/kg} = 5 \text{ kJ/kg}$

3. Aplicando la ecuación siguiente:

$$\Delta H_{\text{vapor}} = (23 \text{ kJ/kg}) * (5) + (5 \text{ kJ/kg}) * (2) = +/-128 \text{ kJ/kg}$$

El valor del resultado tal como se presenta hasta el momento se conoce como valor absoluto. Este valor se puede expresar en términos relativos al dividir el valor absoluto de incertidumbre entre el valor medio de la variable. En este caso la entalpía para las condiciones promedio de 500 °C y 60 bar es de 3423 kJ/kg. Al realizar el cálculo se obtiene:

$$\Delta H_{\text{vapor}} = (+/-128 \text{ kJ/kg}/3423 \text{ kJ/kg}) * 100 = 3.75\%$$

En la tabla siguiente, tomada de la norma ASME PTC-4.1, se establecen los errores porcentuales estimados para cada una de las mediciones realizadas en la determinación de la eficiencia de calderas por los métodos directo e indirecto.

Error esperado en las diferentes variables para el cálculo de la eficiencia de la caldera (Norma ASME-PTC 4.1)

Método directo		
Ítem	Medición	Error porcentual (+/-)
1	Peso de tanques	0.1
2	Volúmenes de tanques	0.25
3	Platina de orificio, hasta el manómetro	0.35
4	Platina de orificio, hasta el registrador de datos	0.55
5	Escala de nivel de consumo de carbón	0.25
6	Platina de orificio fuera del rango de medición, hasta el manómetro	1.25
7	Platina de orificio fuera del rango de medición, hasta el registrador de datos	1.6
8	Poder calorífico superior del carbón	0.5
9	Poder calorífico superior del gas o diesel	0.35
10	Temperatura del vapor sobrecalentado	0.25
11	Presión del vapor sobrecalentado	1.0
12	Temperatura del agua de alimentación	1.25

Método indirecto		
Ítem	Medición	Error porcentual (+/-)
1	Análisis de gases (equipo Orsat)	3.0
2	Temperatura de los gases de salida	0.5
3	Temperatura del aire entrando	0.5
4	Análisis de composición elemental del combustible	1.0
5	Humedad del combustible	1.0

Anexo técnico 5

Formato para la planeación de la prueba de evaluación de la eficiencia térmica de calderas

Reunión de planeación para la evaluación de la eficiencia de calderas

Fecha: _____

Ingenio: _____

Caldera: _____

a) Condiciones de evaluación

Prueba	Combustible	(%)	Producción de vapor (t/h)		

Prueba	Combustible	(%)	Producción de vapor (t/h)		

Prueba	Combustible	(%)	Producción de vapor (t/h)		

b) Fecha de realización de las pruebas: _____

c) Tiempo estimado por prueba (h): _____

Continúa

d) Registro de datos

Ítem	Corrientes de entrada	Variable por registrar	Frecuencia de muestreo para una (1) hora	Responsable de verificación del instrumento	Responsable de la medición durante la prueba
1	Combustible: bagazo, bagacillo, carbón	Humedad			
		Poder calorífico superior			
		% de cenizas			
		Análisis elemental: %C, %H, %O, %N, %S			
		Caudal			
2	Agua de alimentación	Caudal			
		Presión			
		Temperatura de ingreso al domo			
3	Aire de entrada	Caudal			
		Presión			
		Temperatura de entrada			
Ítem	Corrientes de salida	Variable por registrar	Frecuencia de muestreo para una (1) hora	Responsable de verificación del instrumento	Responsable de la medición durante la prueba
4	Vapor sobre-calentado	Caudal			
		Presión			
		Temperatura			
5	Gases de combustión	Análisis de composición %O ₂ , %CO, %CO ₂ , %SO ₂			
		Temperatura de salida del hogar			
		Temperatura de salida del calentador			
		Temperatura de salida del economizador			
		Caudal			
6	Residuos de ciclón y de parrilla	Poder calorífico superior			
		% de cenizas			
7	Purgas de vapor	Caudal			
		Temperatura			

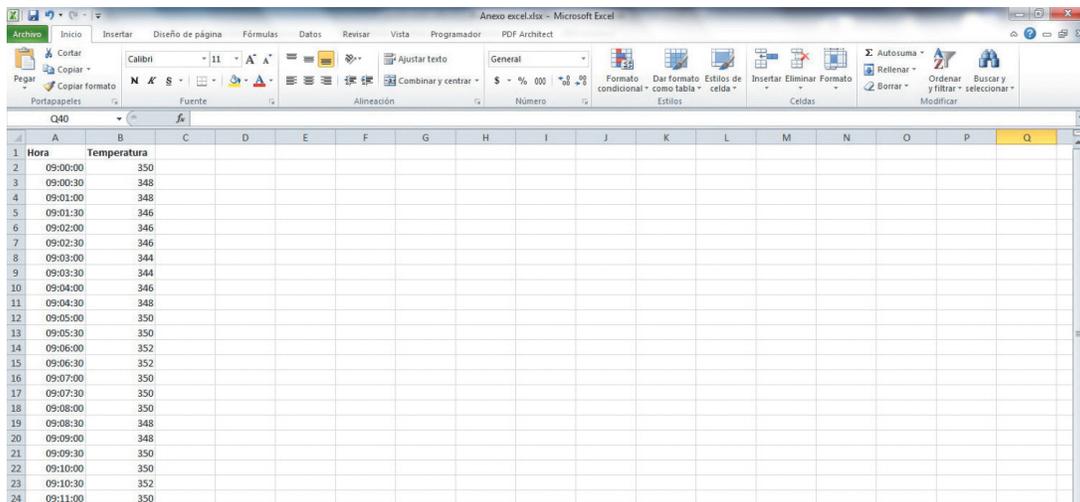
e) La información colectada durante la evaluación será entregada a:

f) La información colectada será procesada por: _____

Anexo técnico 7

Guía de pasos en Excel® para procesamiento de datos

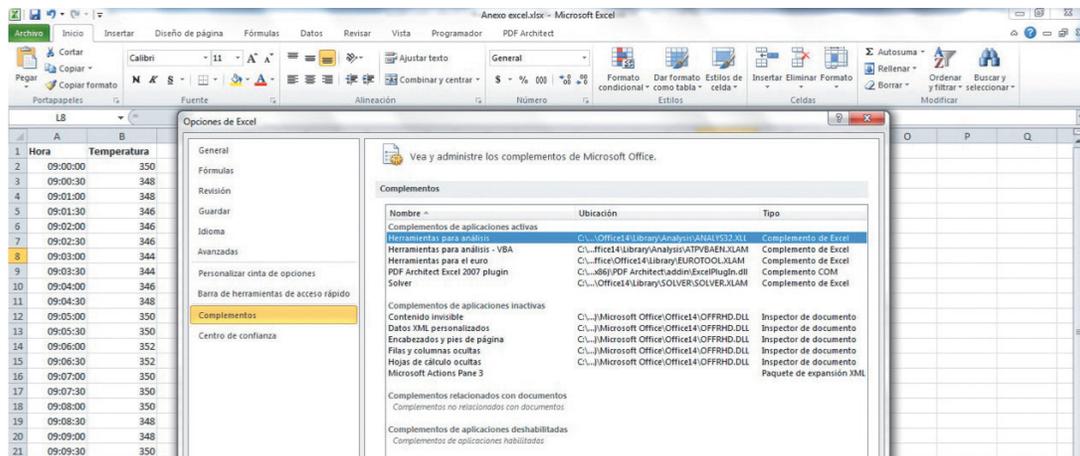
1. Buscar en el menú de inicio/todos los programas/Microsoft Office/Excel.
2. Tabule los datos en dos columnas: 'Hora' y 'Temperatura'



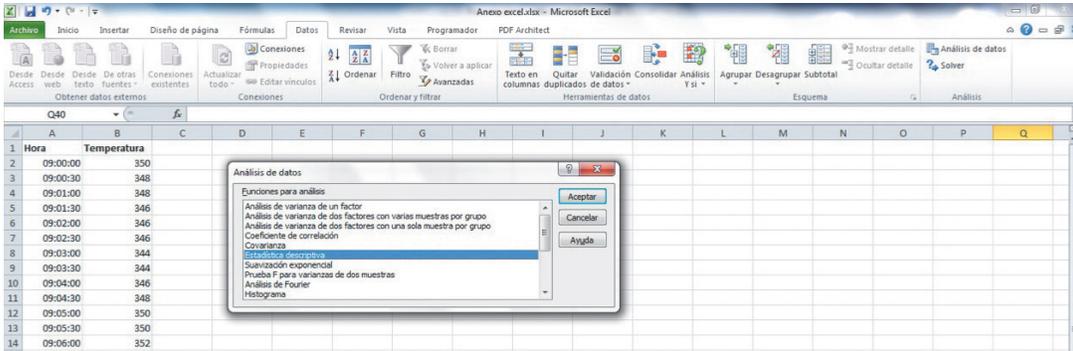
Hora	Temperatura
09:00:00	350
09:00:30	348
09:01:00	348
09:01:30	346
09:02:00	346
09:02:30	346
09:03:00	344
09:03:30	344
09:04:00	346
09:04:30	348
09:05:00	350
09:05:30	350
09:06:00	352
09:06:30	352
09:07:00	350
09:07:30	350
09:08:00	350
09:08:30	348
09:09:00	348
09:09:30	350
09:10:00	350
09:10:30	352
09:11:00	350

3. Realice el análisis estadístico de los datos:

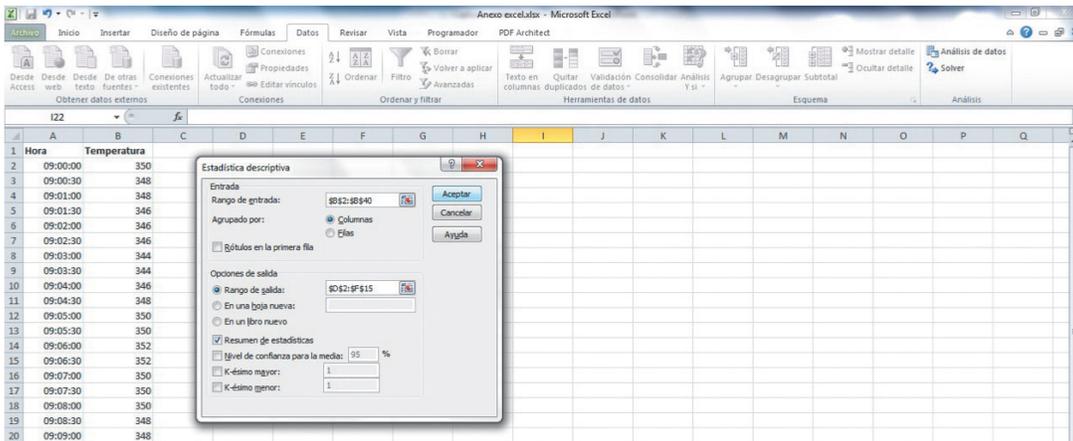
- Active las herramientas para análisis de datos: Herramientas/complementos/Herramientas para análisis



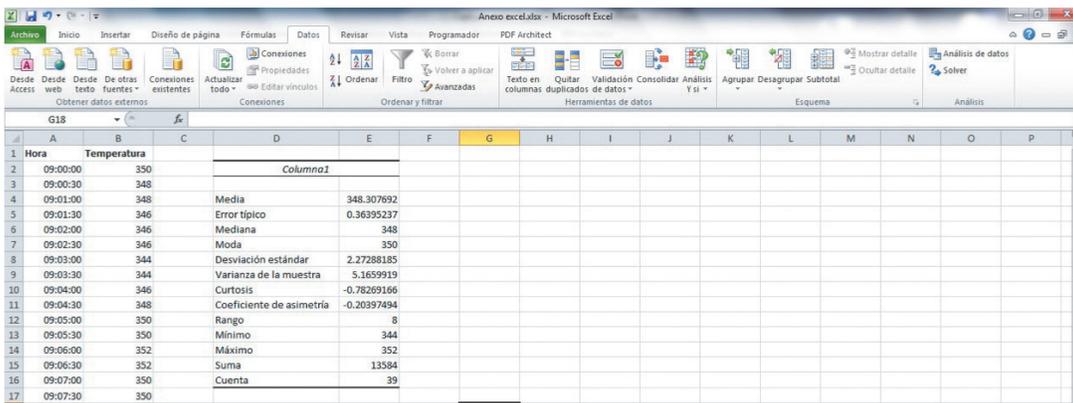
- Despliegue la herramienta para el análisis estadístico de los datos de Temperatura: Herramientas/Análisis de datos/Estadística descriptiva.



- En la ventana de 'Estadística descriptiva' complete los campos:
 - o Rango de entrada: datos digitados en la columna Temperatura
 - o Rango de salida: seleccionar un rectángulo de dos (2) columnas por quince (15) filas, donde se escribirán los valores resultados del análisis.
 - o Seleccionar el cuadro Resumen de estadísticas

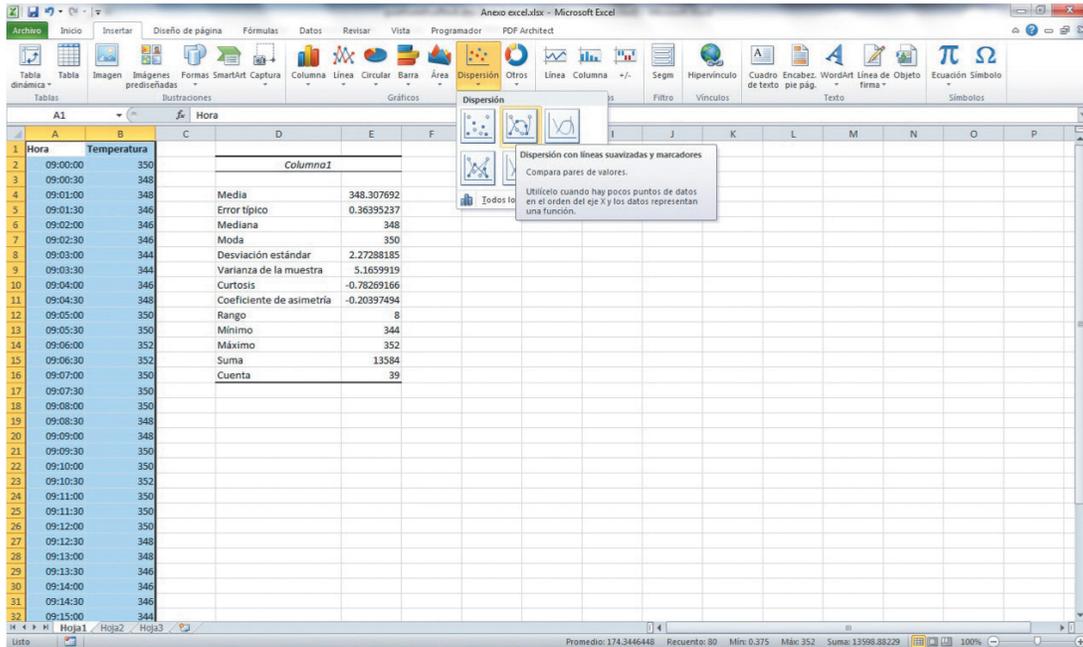


- Después de seleccionar Aceptar, se presentan los resultados

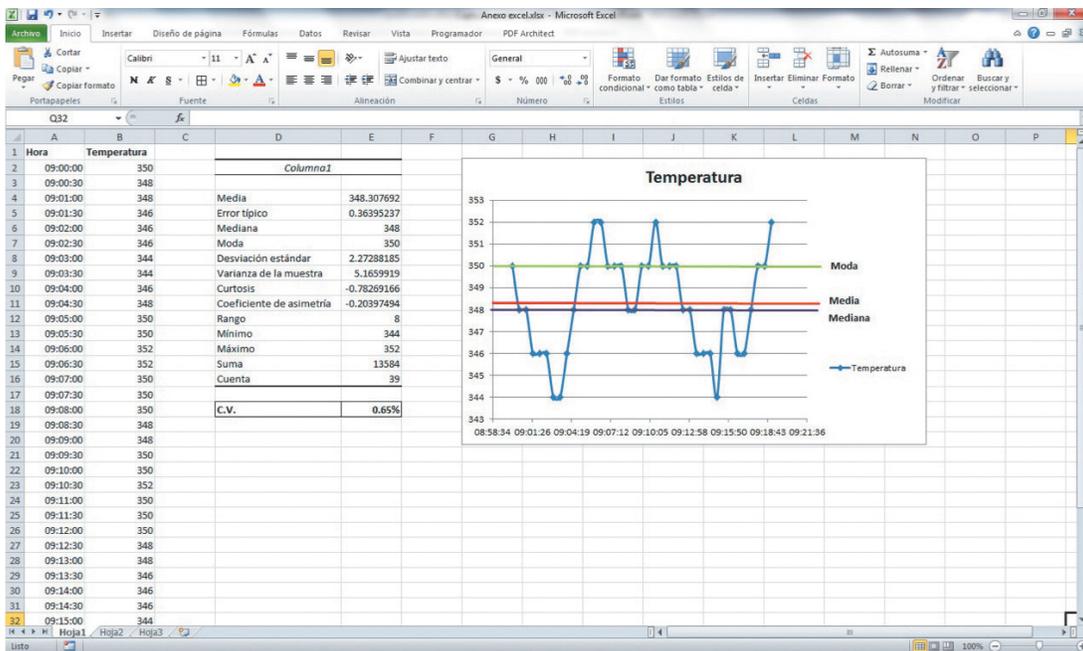


4. Construya un gráfico de Temperatura versus Hora:

- Seleccione los datos digitados: las columnas Hora y Temperatura.
- Seleccione el menú Insertar/Gráficos/Tipo de gráficos/dispersión X-Y/dispersión con puntos de datos conectados por líneas suavizadas.

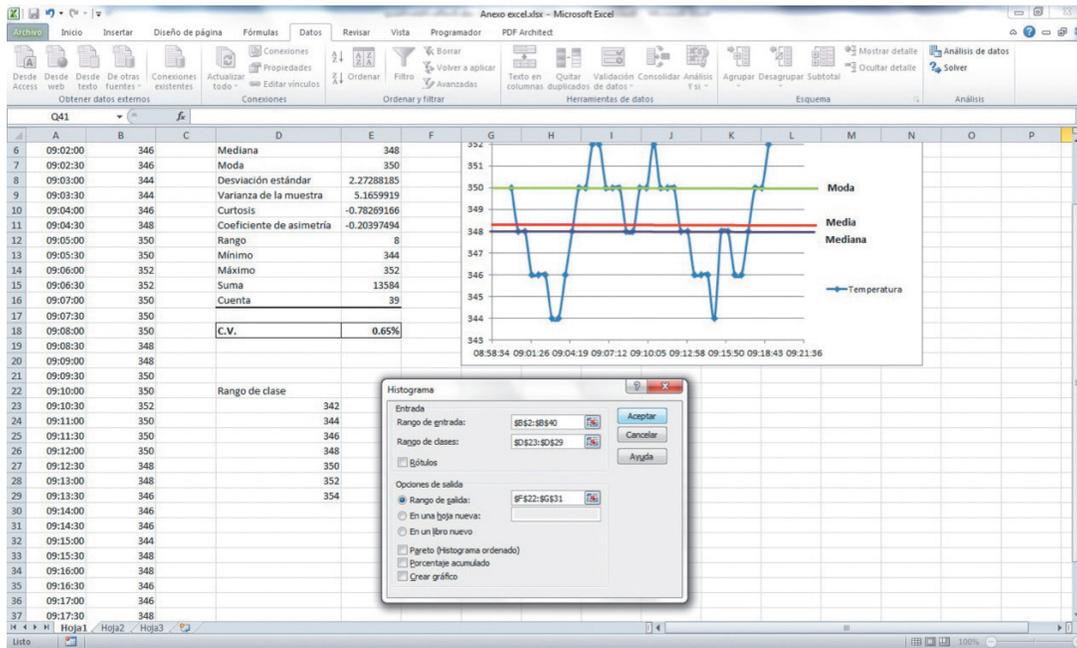


- En el gráfico resultante localice con líneas horizontales trazadas desde el eje Y, los valores: Medio, Mediana y Moda. Calcule el coeficiente de variación (C.V.).



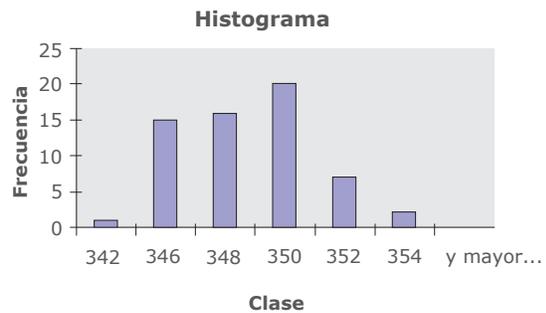
5. Construya el histograma de frecuencia de los datos de la columna Temperatura:

- Digite en una columna Rango de Clase los valores apropiados para selección de intervalos en el histograma.
- Seleccione Herramientas/Análisis de datos/Histograma
- En la ventana desplegada complete los campos:
 - Rango de entrada: datos de la columna Temperatura.
 - Rango de clase: los datos digitados en el anterior ítem.
 - Rango de salida: celdas donde se entregaran los resultados.



- Después de dar Aceptar aparece el Hhistograma de frecuencias con el número de datos, según los intervalos seleccionados.

Clase	Frecuencia
342	1
346	15
348	16
350	20
352	2
y mayor..	0



Anexo técnico 8

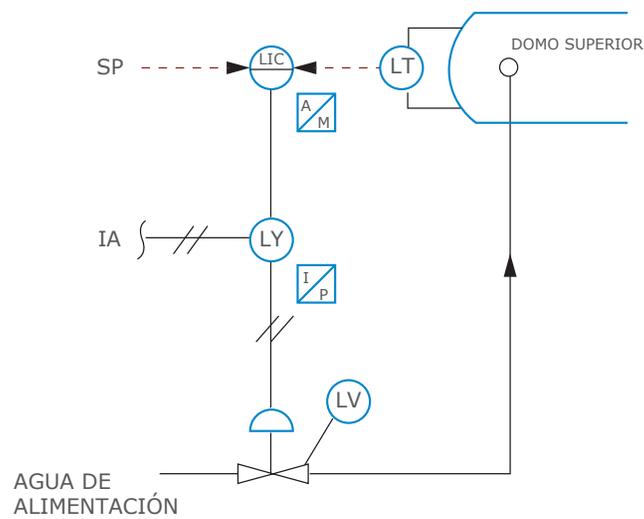
Límites sugeridos por ASME para calidad de agua de alimentación a calderas

Presión del domo (psig)	0-300	301-450	541-600	601-750	751-900	901-1000	1001-1500	1501-2000
Agua de alimentación								
Oxígeno disuelto (mg/l)	<0.04	<0.04	<0.007	<0.007	<0.007	<0.007	<0.007	<0.007
Hierro total (mg/Fe)	≤0.1	≤0.05	≤0.03	≤0.025	≤0.02	≤0.02	≤0.01	≤0.01
Cobre total (mg/Cu)	≤0.05	≤0.025	≤0.02	≤0.02	≤0.015	≤0.015	≤0.01	≤0.01
Dureza total (mg/l CaCO ₃)	≤0.3	≤0.3	≤0.2	≤0.2	≤0.1	≤0.05	≤0.01	≤0.01
Rango pH @ 25°F	7.5 - 10	7.5 - 10	7.5 - 10	7.5 - 10	7.5 - 10	8.5 - 9.5	9.0 - 9.6	9.0 - 9.6
Carbono orgánico total TOC (mg/IC)	<1	<1	<0.5	<0.5	<0.5	<0.2	<0.2	<0.2
Contenido de grasa (mg/l)	<1	<1	<0.5	<0.5	<0.5	<0.2	<0.2	<0.2
Límites para el agua en la caldera								
Silicio (mg/l SiO ₂)	≤150	≤90	≤40	≤30	≤20	≤8	≤2	≤1
Alcalinidad total (mg/CaCO ₃)	<350	<300	<250	<200	<150	<100	No especificado	
Conductividad (µmho/cm@25°F)	<3500	<3000	<2500	<2000	<1500	<1000	≤150	≤100

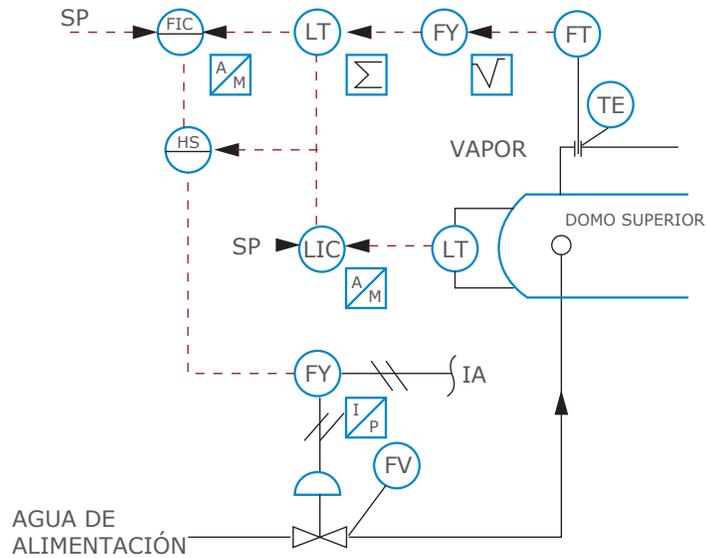
Anexo técnico 9

Principales esquemas de lazos de control para una caldera

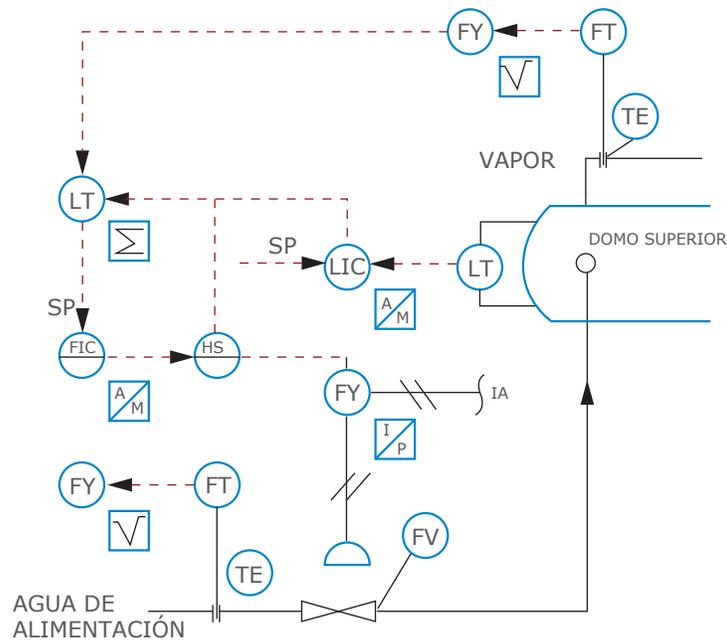
Lazo de control de un elemento para el nivel del domo de vapor



Lazo de control de dos elementos para el nivel del domo de vapor de la caldera



Lazo de control de tres elementos para el nivel del domo de vapor de la caldera



Contenido

Recursos didácticos en www.cenicana.org/pat	99
Autoevaluación final	100
Evaluación de la capacitación	103



Precipitador electrostático en la caldera de un ingenio

Recursos didácticos en www.cenicana.org/pat



La colección de materiales para la transferencia de tecnología en la agroindustria de la caña de azúcar es una herramienta de apoyo metodológico para los facilitadores de la capacitación en el Programa de Aprendizaje y Asistencia Técnica, PAT.

Los facilitadores encuentran los materiales agrupados en las dos series temáticas de la colección: sistema de producción agrícola y sistema de producción industrial. Cada serie contiene las guías metodológicas disponibles para llevar a cabo la planificación de las capacitaciones previstas en el PAT, así como las actividades pedagógicas.

Las ayudas didácticas en cada tema del PAT se hallan ordenadas de un modo práctico, de fácil acceso, con lo cual se espera motivar a los facilitadores a usar los recursos digitales dispuestos en el sitio web de Cenicaña y, principalmente, a complementarlos con sus aportes y con nuevos materiales. Documentos, presentaciones con diapositivas, videos, fotografías, ilustraciones, infografías y materiales de trabajo para la celebración de prácticas y ejercicios hacen parte de esta colección. Bienvenido. El reto de la gestión del conocimiento es ahora.

Para solicitar la contraseña personal de acceso al sitio web ingrese a www.cenicana.org/hoja_registro_pag.php

Una vez registrado en la base de datos puede consultar, copiar, reproducir e imprimir las ayudas didácticas



Recurso Digital

www.cenicana.org/pat

Autoevaluación final

Evaluación de la eficiencia térmica de calderas en ingenios del sector sucro-energético colombiano

Apreciado participante: el siguiente cuestionario tiene por objetivo que usted mismo identifique su nivel de conocimientos acerca de la materia de aprendizaje luego de haber participado en las actividades de capacitación. No tiene carácter calificativo.

Instrucciones: cada pregunta del cuestionario tiene una respuesta única; marque con 'X' la opción que considere correcta en cada caso. Una vez complete todo el cuestionario espere las indicaciones del facilitador para continuar. El tiempo para responder son 30 minutos.

1. **¿Para determinar la eficiencia térmica de la caldera por el método directo que variables de operación se involucran en el cálculo?**
 - A. producción de vapor, humedad de combustible, tasa de molienda, presión de vapor del aire
 - B. presión de vapor vivo, % de oxígeno en gases, presión aire secundario, temperatura agua de alimentación
 - C. producción de vapor, consumo de combustible, temperatura y presión del vapor, poder calorífico del combustible.

2. **¿Qué consideraciones previas a la toma de datos de campo en fábrica se deben tener en cuenta para la evaluación de la eficiencia de una caldera?**
 - A. verificar que la tasa de molienda no se vea afectada por paros debidos a falta de caña
 - B. revisar que los 'set-point' de control de la presión y temperatura del vapor sean los adecuados
 - C. revisar los requerimientos de seguridad industrial para el personal y asegurar que los equipos de medición estén con calibración vigente.

3. **¿Cuáles son los gases de combustión que se deben monitorear empleando equipos portátiles para determinar la eficiencia de la caldera en ingenio por método indirecto?**
 - A. oxígeno, monóxido de carbono, dióxido de carbono, nitrógeno, hidrógeno
 - B. monóxido de carbono, hidrógeno, dióxido de carbono, oxígeno, nitrógeno, dióxido de azufre
 - C. oxígeno, monóxido de carbono, dióxido de carbono, nitrógeno, dióxido de azufre, nitrógeno.

4. **¿Considerando el bagazo como combustible principal en un ingenio, cuáles de sus propiedades afectan la eficiencia térmica de la caldera?**
- A. la humedad y el valor de bagazo (%caña)
 - B. el tamaño de partícula y el contenido de azufre
 - C. el contenido de cenizas, la humedad y el contenido de sacarosa.
5. **¿Por qué es importante controlar la cantidad de aire suministrada al hogar para la eficiencia térmica de una caldera?**
- A. el aire provee el oxígeno necesario para la combustión del bagazo
 - B. el aire es un recurso natural no renovable que debemos cuidar
 - C. el exceso de aire genera pérdidas al disminuir la temperatura en el hogar, el caso contrario incrementa la cantidad de material inquemado.
6. **La norma ASME (American Society Mechanical Engineers) PTC-4.1 solicita un tiempo mínimo para evaluación de la eficiencia de calderas ¿Cuál es?**
- A. 1 hora
 - B. 8 horas
 - C. 4 horas
7. **¿Cuál estadístico de tendencia central es recomendado emplear para el cálculo de la eficiencia de la caldera ante una variable con una desviación estándar muy pequeña?**
- A. el valor promedio es más representativo que la moda dentro de una distribución de datos con una desviación estándar muy pequeña
 - B. la mediana siempre será el valor más apropiado
 - C. en la medida en que la desviación estándar sea muy pequeña, los estadísticos de tendencia central tienden a acercarse, lo que indica que cualquiera de ellos puede ser válido.
8. **¿Cuál de los métodos directo e indirecto aplica la metodología de evaluación de calderas propuesta por Cenicaña para los ingenios sucro-energéticos?**
- A. el método directo es el aplicado en la metodología de Cenicaña
 - B. el método indirecto emplea el cálculo de las pérdidas de calor y energía, por lo cual la metodología Cenicaña exige el monitoreo de gases de combustión
 - C. la metodología Cenicaña combina los métodos directo e indirecto para comprobar el consumo de combustible.

- 9. El mayor causante de pérdidas en la eficiencia térmica de una caldera bagacera de un ingenio es:**
- A. la temperatura de salida de los gases de combustión
 - B. el exceso de aire en el hogar
 - C. la humedad del combustible.
- 10. El desempeño de la caldera es afectado principalmente por el correcto funcionamiento de los lazos de control:**
- A. control de purgas, control de pH del agua de alimentación
 - B. control del agua de imbibición, control de la presión del vapor de escape
 - C. nivel del domo, combustión, presión del hogar, vapor generado.
- 11. El desempeño energético de la caldera afecta directamente los indicadores de:**
- A. pérdidas de sacarosa en bagazo
 - B. consumo de vapor en la estación de elaboración
 - C. indicador de rendimiento eléctrico equivalente -REE.

Sugerencia:

para concluir la capacitación realice una dinámica de retroinformación con las respuestas correctas

1=C; 2=C; 3=C; 4=C; 5=C; 6=C; 7=C; 8=C; 9=C; 10=C; 11=C

Respuestas correctas a la autoevaluación final:

Evaluación de la capacitación

Evaluación de la eficiencia térmica de calderas en ingenios del sector sucro-energético colombiano

Apreciado participante:

Al finalizar la capacitación deseamos conocer sus opiniones sobre diversos aspectos del proceso pedagógico, con el fin de mejorar las actividades de aprendizaje en el futuro. No es necesario que firme esta evaluación.

Para responder las preguntas de cada sección, por favor marque "X" en la casilla que mejor exprese su opinión personal, de acuerdo con la siguiente escala de evaluación:

0	1	2	3	NA
Malo, inadecuado, muy deficiente.	Regular, deficiente.	Bueno, aceptable.	Muy bueno, satisfactorio.	No aplica en esta capacitación

Logro de objetivos y satisfacción de expectativas

En qué medida cree que la capacitación le sirvió para lograr los siguientes objetivos generales:	0	1	2	3	NA
<ul style="list-style-type: none"> Proporcionar herramientas de evaluación al personal encargado de la gestión del desempeño de las calderas en los ingenios azucareros, que les permita el monitoreo constante y acertado de la eficiencia térmica de los equipos de generación de vapor. 					
<ul style="list-style-type: none"> Mantener la eficiencia en la producción de vapor en el ingenio con el fin de garantizar el mantenimiento de los indicadores de desempeño energético del proceso productivo. 					

Continúa

En qué medida cree que la capacitación le sirvió para lograr los siguientes objetivos específicos:	0	1	2	3	NA
<ul style="list-style-type: none"> Explicar las variables principales de operación de las calderas y las labores de toma de datos en fábrica para la evaluación de la eficiencia térmica de una caldera. 					
<ul style="list-style-type: none"> Especificar al personal asignado, la cantidad y el tipo, así como los tiempos y las condiciones de las variables que deben ser monitoreadas en la toma de datos en fábrica, necesarios para la determinación de la eficiencia térmica. 					
<ul style="list-style-type: none"> Organizar los datos recolectados según los principios de la estadística descriptiva básica, empleando programas como Excel. 					
<ul style="list-style-type: none"> Calcular la eficiencia térmica de la caldera mediante los métodos directo e indirecto, a partir de los datos tomados en fábrica. 					
<ul style="list-style-type: none"> Explicar la metodología de operación de la caldera y su relación con el sistema de control e identificar las consecuencias energéticas de la pérdida de eficiencia en la caldera, como una prioridad en su labor diaria. 					
En qué medida cree que la capacitación le sirvió para llenar los vacíos de conocimiento que usted tenía antes del evento:					
<ul style="list-style-type: none"> Los temas técnicos tratados en la capacitación llenaron mis necesidades actuales de conocimiento 					
Cuál es su opinión acerca de las estrategias pedagógicas empleadas en la capacitación:					
<ul style="list-style-type: none"> Exposiciones hechas por los facilitadores 					
<ul style="list-style-type: none"> Trabajos en grupo 					
<ul style="list-style-type: none"> Materiales didácticos que usted recibió durante la capacitación 					
<ul style="list-style-type: none"> Ejercicios y prácticas de campo (cultivo/laboratorio/taller/fábrica) en los que participó. 					
<ul style="list-style-type: none"> Recursos de personal, herramientas, equipos e insumos que estuvieron disponibles en los ejercicios y las prácticas de campo. 					
<ul style="list-style-type: none"> Tiempo dedicado a las distintas actividades de aprendizaje. Exprese su opinión en general, si el tiempo dedicado fue suficiente para lograr los objetivos de aprendizaje propuestos al inicio de la capacitación. 					

Desempeño de los facilitadores

Facilitador

Cómo considera usted que fue el desempeño del facilitador en los aspectos siguientes:	0	1	2	3	NA
• Organización y claridad					
• Presentó y explicó los objetivos de la capacitación					
• Explicó el procedimiento para realizar las actividades (ejercicios, prácticas)					
• Tuvo listos los materiales, herramientas, ayudas y equipos					
• Respetó el tiempo previsto					
• Entregó el material de capacitación y explicó cómo usarlo					
Manejo del contenido					
• Respondió las preguntas de los participantes con propiedad					
• Relacionó los temas teóricos con su aplicación práctica					
• Proporcionó ejemplos para ilustrar los temas expuestos					
Habilidades de interacción					
• Estableció comunicación verbal y no verbal, en forma permanente, con los participantes					
• Mantuvo la motivación de los participantes durante la capacitación					
• Formuló preguntas a los participantes					
• Invitó a los participantes para que formularan preguntas					
• Proporcionó información de retorno inmediata a los participantes durante exposiciones, ejercicios y prácticas.					
Dirección de los ejercicios y las prácticas de campo					
• Aclaró los objetivos de los ejercicios y prácticas					
• Seleccionó y acondicionó el sitio adecuado para las prácticas					
• Organizó a los participantes de manera que todos pudieran participar					
• Explicó y demostró la manera de realizar las prácticas					
• Tuvo a su disposición los materiales demostrativos y/o los equipos necesarios para realizar las prácticas					

Calidad de los materiales de capacitación

Cuál es su opinión acerca de los materiales de capacitación que recibió en las distintas etapas del proceso de aprendizaje:	0	1	2	3	NA
Contenido técnico					
<ul style="list-style-type: none"> • El contenido está dividido en segmentos que siguen una secuencia ordenada y clara 					
<ul style="list-style-type: none"> • El contenido se presenta de manera objetiva: respeta principios y métodos comúnmente aceptados en la práctica 					
<ul style="list-style-type: none"> • El contenido es fácil de leer y comprender 					
Contenido didáctico					
<ul style="list-style-type: none"> • Los objetivos de las actividades de aprendizaje están claramente establecidos 					
<ul style="list-style-type: none"> • Las estructuras de aprendizaje ayudan a que el participante entienda cada componente presentado 					
<ul style="list-style-type: none"> • Las preguntas al iniciar cada unidad orientan a los participantes acerca del tema por desarrollar 					
<ul style="list-style-type: none"> • Los ejercicios y prácticas realmente ayudan a desarrollar las capacidades necesarias para usar la tecnología presentada 					
Diseño visual y presentación					
<ul style="list-style-type: none"> • El tamaño y tipo de las letras hace el texto fácil de leer 					
<ul style="list-style-type: none"> • Las figuras y cuadros son fáciles de entender 					
<ul style="list-style-type: none"> • Las ilustraciones facilitan la comprensión del texto escrito 					
Recursos digitales asociados					
<ul style="list-style-type: none"> • La versión digital de los materiales de capacitación se encuentra disponible 					
<ul style="list-style-type: none"> • Es fácil ubicar el material requerido por los participantes para la celebración de ejercicios y prácticas 					
<ul style="list-style-type: none"> • Los materiales se pueden consultar y descargar rápidamente 					

 Día Mes Año

Gracias por participar en esta evaluación, sus opiniones nos ayudan a mejorar la capacitación.

Referencias bibliográficas

- Aguirre O., C.A.; Grimaldo P., S.A. 2010. Evaluación a la eficiencia de una caldera en un ingenio colombiano. Cenicaña, Cali, Colombia. 42 p. (Documento interno)
- American Society of Mechanical Engineers. 1991. Steam generation units. Power test codes: ASME PTC 4.1. ASME, New York. Aponte, C. 2011. Curso: sistemas de control para calderas industriales. Equipos y Controles Industriales. Bogotá, noviembre 21-25 de 2011.
- Don, C.E.; Mellet, P.; 1977. Calorific values of South African bagasse. Proceedings of the South African Sugar Technologists' Association. 51: 169-173
- Jenkins, B.M.; Baxter, L.L.; Miles Jr., T.R.; Miles, T.R. 1998. Combustion properties of biomass. Fuel Processing Technology. 54: 17-46
- Land Instruments Internacional. 2002. Manual de instrucción: analizador de flujo de gases portable Lancom III. Publicación N.º 770.083.
- Lamb, B.W.; Bilger, R.W. 1977. Combustion of bagasse: literature review. Sugar Technology Reviews. 4, 2 (may): 89-130.
- Marie-Rose, S.C.; Lemieux P., A. Lavoie, J-M. 2011. Conversion of Non-Homogeneous Biomass to Ultraclean Syngas and Catalytic Conversion to Ethanol, Biofel's Engineering Process Technology, Dr. Marco Aurelio Dos Santos Berbnardes (Ed.). Disponible en <http://www.interchopen.com/books/biofuel-s-engineering-process-technology/conversion-of-non-homogeneous-biomass-to-ultraclean-syngas_and-catalytic-convesion-to-ethanol> Consultado el 2/2/2014
- Silva Lora, E. 2003. Curso: calderas de vapor y cogeneración en la industria azucarera. Cali, noviembre de 2003.

Lecturas sugeridas

- Cobo Barrera, D.F. 2012. Pirólisis de residuos de cosecha de caña de azúcar (RAC) como alternativa de aprovechamiento en procesos de cogeneración. Tesis de Maestría en Ingeniería con énfasis en Ingeniería Mecánica. Universidad del Valle, Escuela de Ingeniería. Cali, Colombia. 101 p.
- Fernández, J. (s.f.). Poder calorífico de combustibles industriales. Disponible en <http://www.edutecne.utn.edu.ar/maquinas_termicas/01-poder_calorifico.pdf> Consultado el 3/10/2014.
- Guerrero, J.C.; Trujillo Gómez, C.D.; Gómez Perlaza, A.L.; Gil Zapata, N. 2012. Modelamiento de calderas aplicando la dinámica de fluidos computacional (CFD). V.2, p.418-426. En: Congreso de la Asociación Azucareros de Latinoamérica y el Caribe, 8, y Congreso de la Asociación Colombiana de Técnicos de la Caña de Azúcar, 9. Septiembre 12-14, 2012. ATALAC, TECNICAÑA. Cali, Colombia.
- IKA-Werke GmbH & CO. KG. 2002. Manual de operación: bomba calorimétrica IKA-C5000. IKA-Werke. Staufen, Germany.
- Pauer, R.E. 1990. Lo que ocurre en el interior de la caldera (y en el resto del sistema de vapor) En: Seminario sobre intercambio iónico, agua y energía. IDRECO SUDAMERICANA S.A. Rosario, Argentina. Disponible en <http://www.cdaguas.com.ar/pdf/aguas/09_Lo_que_ocurre_en_el_int.pdf> Consultado el 1/9/2014

Acrónimos y abreviaturas

- ABMA: *American Boiler Manufacturers Association*, en inglés.
- ACPM: Aceite Combustible Para Motores. Es una mezcla de hidrocarburos que se obtiene por destilación fraccionada del petróleo entre 250 °C y 350 °C a presión atmosférica. Este combustible llamado gasóleo, es más sencillo de refinar que la gasolina y suele costar menos. Por el contrario, tiene mayores cantidades de compuestos minerales y de azufre.
- ANSYS: *Swanson Analisis Systems*, en inglés. Programa de diseño que emplea el método de elementos finitos en la resolución de problemas del estado de la mecánica del sólido y volúmenes finitos para problemas de mecánica de fluidos.
- ASME: *American Society of Mechanical Engineers*, en inglés
- ASTM: *American Society for Testing and Materials*, en inglés
- BHP: *Brake Horse Power*, en inglés. Potencia al freno.
- BTU: *British Technical Unit of energy*, en inglés. Unidad técnica británica de energía.
- Cenicaña: Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia
- CFD: *Computational Fluid Dynamics*, en inglés
- CFM: *Cubic Foot per Minute*, en inglés. Unidades de caudal volumétrico de aire.
- EFICAL®: Eficiencia de Caldera. Sigla para la aplicación de Excel® desarrollada por Cenicaña para el cálculo de la eficiencia térmica de calderas, a partir de los datos recolectados durante la prueba de evaluación.
- MCR: *Maximun Continuos Rating*, en inglés. Es la capacidad de una caldera de vapor de producir en forma continua la cantidad establecida de vapor, sin detrimento de sus componentes.
- PAT: Programa de Aprendizaje y Asistencia Técnica
- PCS: Poder Calorífico Superior
- PCI: Poder Calorífico Inferior
- PTC: *Power Test Codes*, en inglés
- REE: Rendimiento Eléctrico Equivalente
- RTD: *Resistance Temperature Detector*, en inglés.

Glosario de términos

Bagazo: residuo del proceso de molienda, constituido básicamente por la fibra vegetal contenida en la caña. Es empleado como combustible en las calderas de los ingenios.

Biomasa: materia orgánica originada en un proceso biológico, espontáneo o provocado, utilizable como fuente de energía.

Calor sensible: es aquel que recibe un cuerpo o un objeto y hace que aumente su temperatura sin afectar su estructura molecular y por lo tanto su estado.

Calor latente: es la energía requerida por una cantidad de sustancia para cambiar de fase, de sólido a líquido (calor de fusión) o de líquido a gaseoso (calor de vaporización).

Ceniza: es el producto de la combustión de algún material, compuesto por sustancias inorgánicas no combustibles, como sales minerales. Una parte queda como residuo en forma de polvo depositado en el lugar donde se ha quemado el combustible (madera, residuos) y parte puede ser expulsada al aire como parte del humo.

Cogeneración: Proceso de producción combinada de energía eléctrica y energía térmica, que hace parte de una actividad productiva destinadas al consumo propio o de terceros en procesos industriales o comerciales.

Datos de campo: valores experimentales de variables específicas registrados durante la ejecución de la experimentación en el sitio planeado.

Damper: dispositivo en forma de cortina o álabe que cubre total o parcialmente la entrada o salida de un fluido en un ducto.

Eficiencia térmica de caldera: relación entre la energía del vapor producido y la energía del combustible suministrado hacia la caldera.

Entalpía: propiedad termodinámica de una sustancia que expresa la suma de su energía interna y su energía de flujo.

Estadígrafo: es la medida que en estadística se aplica sobre una muestra. En general se utilizan dos tipos: los de tendencia central (media, mediana, moda) y los de dispersión (desviación estándar, varianza, coeficiente de variación).

Estrategia de control: acciones lógicas a seguir de acuerdo con el comportamiento de las variables de entrada de un sistema, con el objetivo de mantener los valores de las variables de salida dentro de los rangos deseados.

Fueloil: es una fracción del petróleo que se obtiene como residuo en la destilación fraccionada. De aquí se obtiene entre 30 y 50% de esta sustancia. Es el combustible más pesado de los que se puede destilar a presión atmosférica. Está compuesto por moléculas con más de 20 átomos de carbono, y su color es negro. El fueloil se usa como combustible para plantas de energía eléctrica, calderas y hornos.

Gas natural: es una de las varias e importantes fuentes de energía no renovables formada por una mezcla de gases ligeros que se encuentra en yacimientos de petróleo, disuelto o asociado con el petróleo o en depósitos de carbón. Está compuesto principalmente por metano en cantidades que comúnmente pueden superar el 90 o 95% y suele contener otros gases como nitrógeno, CO₂, H₂S, helio y mercaptanos.

Gases de combustión: son producidos como resultado propio del proceso de combustión. Se descargan a la atmósfera a través de una tubería o chimenea. Aunque gran parte de los gases de combustión está compuesto por el relativamente inofensivo dióxido de carbono, también contiene sustancias nocivas o tóxicas como el monóxido de carbono (CO), hidrocarburos (HC), óxidos de nitrógeno (NO_x) y dióxidos de azufre (SO₂). En los gases se arrastran cenizas o material que no alcanzó a participar en la combustión.

Ingenio sucro-energético: planta de producción combinada de azúcar y energía eléctrica a partir del procesamiento de la caña de azúcar.

Lazo de control: arreglo de elementos orientados al mantenimiento de condiciones específicas en un proceso, maquinaria o sistema.

Macro de Excel: es una serie de instrucciones que se almacenan para que se puedan ejecutar de manera secuencial mediante una sola llamada u orden de ejecución. Dicho de otra manera, una macro-instrucción es una instrucción compleja, formada por otras instrucciones más sencillas. Esto permite la automatización de tareas repetitivas.

Material inquemado: sustancias tales como hollín, monóxido de carbono e hidrocarburos, que proceden de la combustión incompleta del combustible. Estos inquemados pueden ser sólidos o gaseosos. Los sólidos están formados mayoritariamente por partículas de carbono e hidrocarburos fraccionarios.

Método directo: metodología para determinar la eficiencia térmica de la caldera a partir de la relación entre energías de entrada y salida.

Método interactivo: trata de resolver un problema (como una ecuación o un sistema de ecuaciones) mediante aproximaciones sucesivas a la solución, empezando desde una estimación inicial. Esta aproximación contrasta con los métodos directos, que tratan de resolver el problema de una sola vez.

Platina de orificio: es el elemento primario más sencillo para la medición de flujo, consistente en una lámina plana circular con un orificio concéntrico, excéntrico ó segmentado. Las dimensiones del orificio dependen del fluido a medir y sus condiciones de operación.

Protocolo: reglas y acciones establecidas con relación al cumplimiento de un plan u objetivo trazado.

Relación aire-combustible: cociente entre las cantidades másicas de aire y de combustible involucrados en un proceso de combustión.

Radiación: es un fenómeno consiste en la propagación de energía en forma de ondas electromagnéticas o partículas subatómicas a través del vacío o de un medio material.

Sacarosa: es el principal componente del azúcar común. En términos químicos es un disacárido de glucosa y fructosa. La sacarosa es un producto intermedio principal de la fotosíntesis, en muchas plantas constituye la forma principal de transporte de azúcar desde las hojas a otras partes de la planta. En la naturaleza se encuentra en un 20% del peso en la caña de azúcar y en un 15% del peso de la remolacha azucarera.

Tamiz: utensilio que se usa para separar las partes finas de las gruesas de una misma sustancia y que está formado por una tela metálica o rejilla tupida que está sujeta a un aro.

Temperatura de inflamación: temperatura a la que un combustible emite gases inflamables suficientes para alcanzar en su atmósfera el límite inferior de inflamabilidad, a partir del cual, con una fuente de calor externa, se puede producir una combustión no auto-mantenida. La temperatura de inflamación del azufre y de la madera es de cerca de 270 °C y la del carbono es 350 °C.

Tubo de Pitot: instrumento utilizado para calcular la presión total, también llamada presión de estancamiento, presión remanente o presión de remanso (suma de la presión estática y de la presión dinámica). Fue inventado por el ingeniero Henri Pitot en 1732 y fue modificado en el siglo XIX por Henry Darcy. Se utiliza mucho para medir la velocidad del viento en aparatos aéreos y para medir las velocidades de aire y gases en aplicaciones industriales. Los tubos Pitot miden la velocidad en un punto dado de la corriente de flujo y no la media de la velocidad del viento.

Vapor: agua en fase gaseosa.

Vapor vivo: vapor que se genera en la caldera.

Esta guía metodológica sobre la evaluación de la eficiencia térmica de calderas y las ayudas didácticas relacionadas hacen parte de la Colección de materiales para la transferencia de tecnología en la agroindustria de la caña de azúcar, y fueron producidas por Cenicaña como insumos del Programa de Aprendizaje y Asistencia Técnica, PAT.

Quienes reciben los materiales directamente de Cenicaña están autorizados para reproducirlos y adaptarlos en los procesos de capacitación a su cargo, siempre que las modificaciones contribuyan al logro de los objetivos de aprendizaje propuestos por los autores.

Cenicaña mantendrá abiertos sus canales formales de comunicación con los usuarios de la guía para intercambiar las actualizaciones en la materia de aprendizaje y atenderá oportunamente las solicitudes de servicios requeridos para la celebración de las actividades pedagógicas de acuerdo con los términos de compromiso definidos en el PAT.

Publicación Cenicaña

Producción editorial

Servicio de Cooperación Técnica y Transferencia de Tecnología

Coordinación editorial

Victoria Carrillo C.

Edición de textos

Alberto Ramírez P.

Diseño gráfico y carátula

Alcira Arias V.

Diagramación

Luis Hernando Mesa Ch.

Fotografías

Banco de imágenes Cenicaña

Impresión

Feriva S.A. (Cali, Colombia)



Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia

Cenicaña es una corporación privada, sin ánimo de lucro, fundada en 1977 por iniciativa de la Asociación de Cultivadores de Caña de Azúcar de Colombia, Asocaña, y financiada con donaciones directas de los ingenios azucareros y los proveedores de caña localizados en el valle del río Cauca.

Su misión es contribuir al desarrollo, la competitividad y la sostenibilidad del sector agroindustrial de la caña de azúcar de Colombia, mediante la generación de conocimiento y la innovación tecnológica, a través de la investigación, la transferencia de tecnología y la prestación de servicios especializados, con base en un sistema integrado de gestión, para que el sector sea reconocido por sus aportes socioeconómicos y la conservación ambiental de las zonas productoras de caña de azúcar.

Así, el Centro favorece la innovación en la agroindustria gestionando proyectos de investigación y desarrollo acordes con la planeación estratégica del sector productivo. Dirige programas de investigación en variedades, agronomía y procesos de fábrica, y servicios especializados en información y documentación, tecnología informática, análisis económico y estadístico, cooperación técnica y transferencia de tecnología.

En sus funciones de apoyo sectorial, Cenicaña administra la Red Meteorológica Automatizada y la Red PM-10 de la agroindustria azucarera en el valle del río Cauca. Atiende solicitudes de importación de variedades en Colombia y presta servicios de propagación y multiplicación de variedades, análisis de suelo y tejido foliar, inspección fitopatológica en campo y laboratorio, diagnóstico de enfermedades de la caña de azúcar, e información y documentación.

Estación Experimental, vía Cali-Florida km 26.
San Antonio de los Caballeros, Florida (Valle del Cauca, Colombia).



La colección de materiales para la transferencia de tecnología en la agroindustria de la caña de azúcar está dirigida a los profesionales de distintas disciplinas vinculados con el sector azucarero colombiano, que en sus competencias de rol ejercen como facilitadores de la transferencia tecnológica y la adopción, particularmente a quienes planifican, ejecutan y evalúan las actividades de capacitación en las que participan los usuarios finales de la tecnología en el Programa de Aprendizaje y Asistencia Técnica (PAT). Algunos materiales de la colección están dirigidos a los participantes en la capacitación y les serán entregados por los facilitadores.

Esta guía metodológica sobre la evaluación de la eficiencia térmica de calderas es una herramienta de aprendizaje diseñada por Cenicaña para facilitar la transferencia de tecnología en el sector sucro-energético colombiano; está dirigida a los profesionales y a los técnicos encargados de los procesos de funcionamiento y operación de las calderas en las fábricas de la agroindustria, quienes en el desarrollo de sus competencias son facilitadores de la gestión de conocimiento y como tales, integrantes del Programa de Aprendizaje y Asistencia Técnica, PAT.

El contenido está ordenado en cuatro unidades que documentan de una manera aproximada cómo funciona una caldera en un ingenio colombiano y cómo se puede mejorar su desempeño térmico mediante la evaluación de los indicadores de eficiencia, teniendo en cuenta el proceso sucro-energético completo. Las referencias se basan en normas internacionales y, principalmente, en los productos del trabajo en cogeneración de Cenicaña, obtenidos en el Programa de Procesos de Fábrica a través de proyectos de investigación y cooperación técnica con los ingenios sucro-energéticos en el valle del río Cauca.

El Programa de Procesos de Fábrica publicó en 1999 el Manual de Auditoría Energética para los Ingenios Azucareros de Colombia con los parámetros y los procedimientos para el control efectivo de la generación y la utilización de la energía en un ingenio. En 2003 entregó la primera versión de la herramienta computacional CENIPROF® que permite observar distintos escenarios de operación de un ingenio azucarero en estado estable, a través de los balances de masa y energía de las operaciones unitarias. En 2012 incursionó en la modelación de los fenómenos físico-químicos en calderas utilizando herramientas de análisis computacional de la dinámica de fluidos (CFD, por su sigla en inglés). Actualmente aplica estas metodologías en el programa de evaluaciones del rendimiento térmico que realiza desde 2006 en los ingenios sucro-energéticos de Colombia.

www.cenicana.org/pat



Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia
Calle 58N No. 3BN-110 Cali, Colombia
www.cenicana.org

