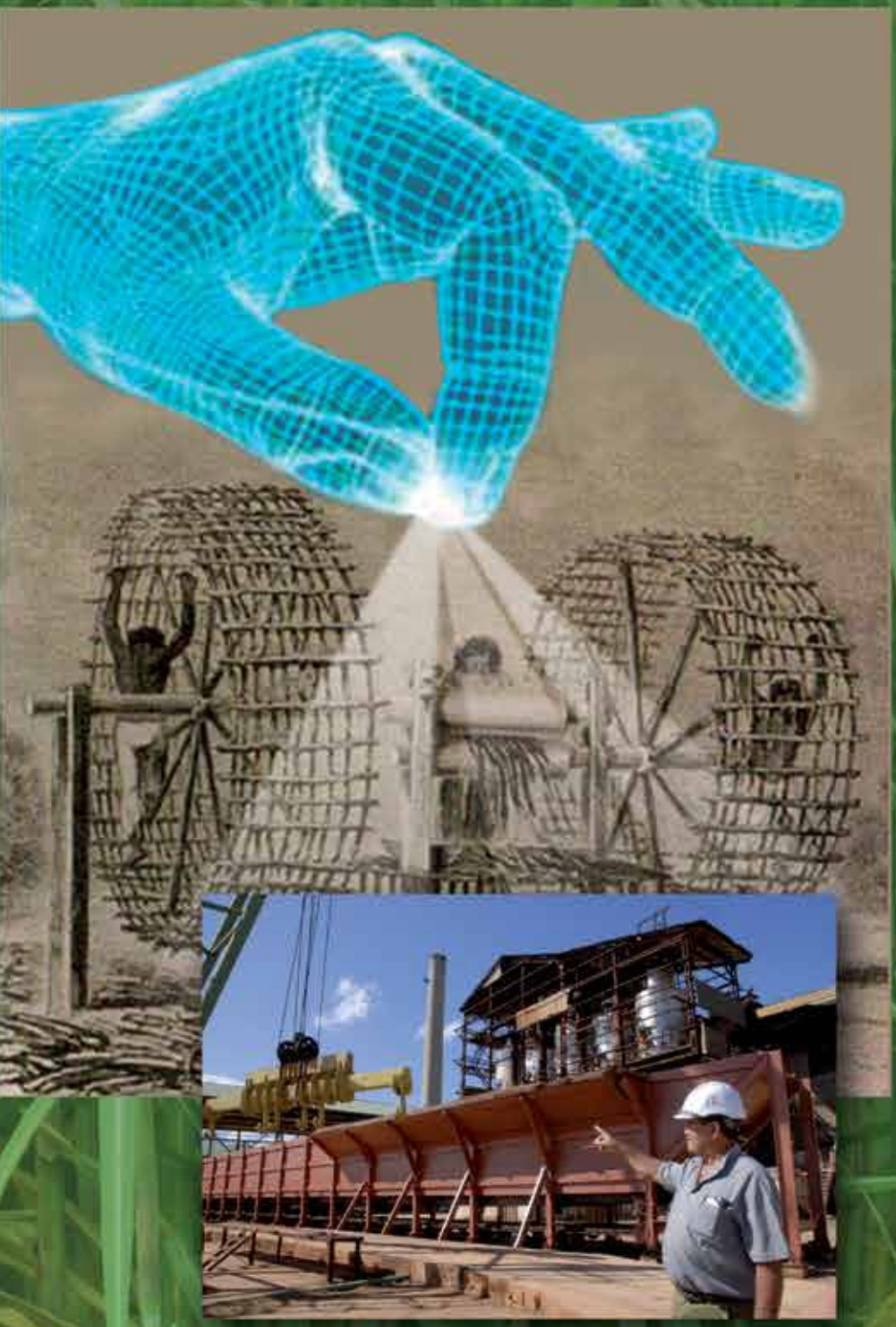
Guía para la identificación de áreas, procesos y equipos críticos energéticamente e implementación de indicadores de desempeño energético



Judith Rodríguez Salcedo
Omar Prías
Natalia Perea Velasco
Jenny Ibárguen Valverde
María Isabel Gutiérrez

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE PALMIRA
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ADMINISTRACIÓN
GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN EFICIENCIA ENERGÉTICA Y ENERGÍAS ALTERNATIVAS - GEAL

Guía para la identificación de áreas, proceso y equipos críticos energéticamente e implementación de indicadores de desempeño energético

Guía para la identificación de áreas, proceso y equipos críticos energéticamente e implementación de indicadores de desempeño energético

Judith Rodríguez Salcedo
Omar Prías Caicedo
Natalia Perea Velasco
Jenny Lorena Ibargüen Valverde
María Isabel Gutiérrez López

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE PALMIRA
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ADMINISTRACIÓN
GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN EFICIENCIA ENERGÉTICA
Y ENERGÍAS ALTERNATIVAS - GEAL

2014

Guía para la identificación de áreas, proceso y equipos críticos
energéticamente e implementación de indicadores de desempeño energético
Judith Rodríguez Salcedo, Omar Fredy Prías Caicedo, Natalia Perea Velasco, Jenny Lorena Ibarguen Valverde, María Isabel Gutiérrez - Santiago de Cali: Universidad Nacional, Sede Palmira, 2014
64 p.:
Incluye índice
ISBN: 978-958-761-948-5
1. Trayectoria en I+D+I en gestión de la energía en Colombia. 2. ¿Cómo identificar áreas críticas energéticas en las empresas? ¿Cuál es la funcionalidad de los indicadores de desempeño energéticos. 3. Metodología para la construcción y seguimiento de un indicador de desempeño energético. 4. Caso de estudio: ingenios azucareros. 5. Integración de indicadores ambientales al modelo de gestión integral de la energía.
Caso de estudio: comportamiento del material particulado
emitido en una caldera bagacera

Guía para la identificación de áreas,
proceso y equipos críticos energéticamente
e implementación de indicadores de desempeño energético

© Universidad Nacional de Colombia - Sede Palmira
Facultad de Ingeniería y Administración
Grupo de Investigación en Eficiencia Energética
y Energías Alternativas - GEAL

Autores
© Judith Rodríguez Salcedo
Omar Prías Caicedo
Natalia Perea Velasco
Jenny Lorena Ibargüen Valverde
María Isabel Gutiérrez López, autores

Primera edición, Palmira, 2014

ISBN: 978-958-761-948-5

Coordinación Editorial
Judith Rodríguez Salcedo

Natalia Perea Velasco
Ingeniera Agroindustrial

Diagramación:
Impresora Feriva S.A.

Prohibida la reproducción total o parcial por cualquier medio sin la autorización escrita del titular de los derechos patrimoniales

Impreso y hecho en Cali, Colombia

Los autores

Judith Rodríguez Salcedo, Coordinadora del Grupo de Investigación en Eficiencia Energética y Energías Alternativas-G.E.A.L, Ingeniera Química de la Fundación Universitaria de América. Especialista en Ecología, Medio Ambiente y Desarrollo de la Universidad Incca de Colombia. Especialista en Ingeniería Sanitaría y Ambiental , Magister en Ingeniería Sanitaría y Ambiental de la Universidad del Valle. Candidata a Doctorado en Agroecología de la Universidad Nacional de Colombia. Profesora Asociada adscrita al Departamento de Ingeniería de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Palmira. Áreas de Actuación: Termodinámica, Balance de Masa y Energía en Sistemas Productivos, Energía, Ambiente y desarrollo, Eficiencia Energética.

Omar Fredy Prías Caicedo, Coordinador del grupo de Investigación del Sector Eléctrico Colombiano-GRISEC, Ingeniero Eléctrico de la Universidad Nacional de Colombia. Especialista en Gerencia de Tecnología de la Escuela de Administración de Negocio-E.A.N. Magister en Eficiencia Energética de la Universidad de Cienfuegos Carlos Rafael Rodríguez. Profesor Asociado adscrito al Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Sede Bogotá. Áreas de Actuación: Ingeniería Eléctrica, Electrónica e Informática, Eficiencia Energética, Desarrollo de políticas; estrategias; planes y programas en Energía Eléctrica y Fuentes No Convencionales.

Natalia Perea Velasco, Miembro del Grupo de Investigación en Eficiencia Energética y Energías Alternativas-G.E.A.L Ingeniera Agroindustrial de la Univeridad Nacional de Colombia, Candidata Maestría en Ingeniería Ambiental. Diplomada como Gestora Energética Avanzada por las Universidades del Valle, Nacional de Colombia y Autónoma de Occidente. Auditora energética ISO 50001 del ICONTEC. Líneas de actuación: eficiencia y gestión energética y ambiental.

Jenny Lorena Ibarguen Valverde, Miembro del Grupo de Investigación en Eficiencia Energética y Energías Alternativas-G.E.A.L. Ingeniera Agroindustrial de la Universidad Nacional de Colombia. Gestora Energética de la Universidad del Valle, Nacional y Autónoma de Occidente. Auditora en las Normas: de Eficiencia Energética ISO 50001 del ICONTEC y Sistema de Gestión Ambiental basado en la NTC ISO 14001:2004 de la Universidad Nacional de Colombia. Joven Investigadora COLCIENCIAS 2013-Convocatoria No. 617. Áreas de Actuación: Ingeniería de Producción Alimentaria y No alimentaria, Gestión Energética y Auditorias de Sistemas de Calidad, Ambiental y Energético.

María Isabel Gutiérrez, Miembro del Grupo de Investigación en Eficiencia Energética y Energías Alternativas-G.E.A.L. Estudiante de Ingeniería Ambiental. Diplomada como Gestora Energética Avanzada por las Universidades del Valle, Nacional de Colombia y Autónoma de Occidente, Auditora energética ISO 50001 del ICONTEC. Líneas de actuación indicadores ambientales y gestión energética.

¿Qué provecho tiene el hombre de todo su trabajo con que se afana debajo del sol? Generación va, y generación viene; mas la tierra siempre permanece. Sale el sol, y se pone el sol, y se apresura a volver al lugar de donde se levanta. El viento tira hacia el sur, y rodea al norte; va girando de continuo, y a sus giros vuelve el viento de nuevo. Los ríos todos van al mar, y el mar no se llena; al lugar de donde los ríos vinieron, allí vuelven para correr de nuevo. Todas las cosas son fatigosas más de lo que el hombre puede expresar; nunca se sacia el ojo de ver, ni el oído de oír. ¿Qué es lo que fue? Lo mismo que será. ¿Qué es lo que ha sido hecho? Lo mismo que se hará; y nada hay nuevo debajo del sol.

¿Hay algo de que se pueda decir: "He aquí esto es nuevo"? Ya fue en los siglos que nos han precedido.

ECLESIASTÉS 1: 3-10

Agradecimientos

Los Autores agradecemos a todos quienes contribuyeron al resultado de esta guía:

A DIOS, *"Porque Jehová da la sabiduría,*
Y de su boca viene el conocimiento y la inteligencia." Prov. 2:6.

A la Universidad Nacional de Colombia por generar mecanismos de financiamiento, mediante proyectos, para que los grupos de Investigación podamos apoyar a nuestros estudiantes de Posgrado

Dirección de Investigación de la Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira-DIPAL y demás dependencias de la Sede, por el apoyo logístico tanto para el desarrollo de la investigación, como para la impresión de esta guía.

Al Centro de Investigación de la Caña de Azúcar-CENICAÑA, por su apoyo durante la ejecución de la investigación en procesos productivos en ingenios.

A COLCIENCIAS y la UPME, porque han contribuido en la formación de actores que trabajan en pro de fortalecer las capacidades en I+D+I en Eficiencia Energética, mediante la financiación de proyectos como el *Programa Estratégico Nacional, Sistemas de Gestión Integral de la Energía-PEN-SGIE*, en el cual el grupo GEAL participó activamente en las etapas de formación, pre caracterización y caracterización empresarial en varias empresas del Valle del Cauca.

A la Universidad Autónoma de Occidente, porque dentro del proyecto PEN SGIE, coordinó la etapa del caracterización Energética y productiva de varias empresas de la región. Estas experiencias enriquecieron la fundamentación teórica del presente documento.

A la empresa IMPRESORA FERIVA S.A. por su gran profesionalismo y la generosidad, de todo el equipo de trabajo, durante el diseño, artes e impresión de esta guía. Con la pulcritud y solidaridad de Impresora FERIVA S.A. fue posible tener este documento en la elegancia y precisión debidas

A todos ustedes que invierten su tiempo en leer esta guía, en aprender y construir nuevos conocimientos.

Mil gracias y bendiciones.

Contenido

Introducción 13

Capítulo 1
Trayectoria en I+D+i en gestión de la energía en Colombia 17

Capítulo 2
¿Cómo identificar áreas críticas energéticas en las empresas?
¿Cuál es la funcionalidad de los indicadores de desempeño energéticos en estas áreas? 21

1. Parámetros para la selección del área, proceso o equipo crítico a controlar energéticamente 22
2. ¿Qué son los indicadores de desempeño energético? 24
3. ¿Cómo se clasifican los indicadores de desempeño energético? 24
   A. Indicadores de desempeño energéticos lineales e independientes del nivel productivo 24
   B. Indicadores de desempeño energético asociados a la producción 25
      • Índices de consumo (IC) 26
      • Indicador de Eficiencia Base 100 (IB100) 26
      • Indicador de Tendencia o Sumas Acumulativas (CUSUM) 26
4. ¿Cómo seleccionar el tipo de IDE acorde con el área, proceso o equipo crítico? 26
5. Aplicación, verificación y seguimiento del indicador 27

Capítulo 3
Metodología para la construcción y seguimiento de un indicador de desempeño energético 29

1. ¿Cómo construir y seleccionar un IDE? 30
   Construcción de indicadores de desempeño energético lineales e independientes del nivel de producción 30
   Construcción de indicadores de desempeño energético asociados a la producción 31
   I. Modelo matemático que relaciona el consumo energético y la producción 31
   II. Generación del gráfico de desempeño energético asociado a la producción 32

2. ¿Cómo identificar los parámetros de medición y control que impactan en el comportamiento del IDE? 33
3. Estrategias para el seguimiento del proceso, equipo o área crítica....35

Capítulo 4
Caso de estudio: ingenios azucareros 41
1. Proceso productivo para la elaboración de azúcar....41
2. Identificación de procesos críticos de control energético 42
3. ¿Cómo identificar el tipo de indicador y variables a controlar? 44
4. Construcción de IDE y resultados obtenidos 47

Capítulo 5
Integración de indicadores ambientales al modelo de gestión integral de la energía. Caso de estudio: comportamiento del material particulado emitido en una caldera bagacera 55
Metodología utilizada para el desarrollo de la investigación 56

Glosario 59
Bibliografía 61

Introducción

El crecimiento y desarrollo de las sociedades conlleva invariablemente requerimientos energéticos y consecuentes efectos ambientales. La amenaza de agotamiento de los recursos energéticos no renovables ha conducido a que investigadores, gobiernos y empresarios, entre otros actores, impulsen fuentes energéticas alternativas y el uso de recursos energéticos renovables. Así, por ejemplo, entre los primeros se cuenta con sistemas de generación eólicos, uso de energía solar, como sistemas industrializados. Entre los energéticos renovables figuran biocombustibles en fabricación industrial como biodiésel y bioetanol, y con biogás en sistemas de producción rural. El desarrollo de otras fuentes renovables a nivel industrial avanza, pero las demandas de energía lo hacen a mayor velocidad, de manera que los recursos tanto renovables como no renovables no soportarían la impetración.

Esta circunstancia ha originado la necesidad de racionalizar el consumo de energía, su uso eficiente y la búsqueda de nuevas formas de aprovechamiento de las fuentes energéticas que garanticen aplicaciones limpias, seguras y económicas. Entre las medidas de uso racional y eficiente de energía se visualizan dos campos bien definidos: i) La implementación de equipos de uso final de la energía más eficientes, y ii) la implementación de sistemas de gestión de la energía para su uso eficiente. En este último se reconocen los procesos, se caracterizan y se corrigen prácticas en las diferentes etapas del proceso que repercuten en los menores consumos de energía para los fines del proceso. El control o monitoreo de las medidas de uso racional y eficiente de la energía se realiza a partir de la implementación de indicadores e índices de desempeño energético.

Los indicadores e índices de desempeño son expresiones cuantitativas del comportamiento y el desempeño de un proceso, cuya magnitud, al ser comparada con algún nivel de referencia, puede señalar una desviación sobre la cual se toman acciones correctivas o preventivas según el caso. Así pues, un indicador o índice de consumo energético (IDE) está definido como la cantidad de energía consumida por unidad de producción o servicios medidos en términos físicos (productos o servicios prestados), por ejemplo: la energía consumida puede establecerse en unidades de kWh, litros de combustible, toneladas de fuel oil, toneladas equivalentes de petróleo, entre otros. Mientras que la producción o servicio puede expresarse en unidades físicas tales como: toneladas de acero, hectolitros de cerveza, habitaciones-días ocupadas, toneladas-kilómetros transportadas, entre otros.

Entre los beneficios que se pueden obtener al implementar un sistema de indicadores de desempeño energético en cualquier entidad, podemos encontrar tres aspectos importantes:

1. **Mejoramiento continuo:** dado que permiten realizar una autoevaluación energética y operativa del área, equipo o proceso al que pertenece el indicador.
2. **Benchmarking (comparación):** por ser indicadores que generalmente todas las organizaciones monitorean, permiten conocer y comparar su desempeño energético con el entorno.
3. **Satisfacción total:** este último aspecto se da en la medida en que se optimicen los bienes energéticos y se alcancen altos niveles de productividad y competitividad.

Esta guía es el resultado de investigaciones realizadas por miembros activos del GEAL mediante proyectos en gestión energética en los cuales se recopiló y manejó información para la caracterización de varias empresas de la región, y se elaboraron propuestas de gestión en las empresas en pro de ahorros de energía para mantener la producción o aumentarla con los mismos consumos de energía. Con base en dichas experiencias, el grupo de investigación ve la necesidad de escribir un documento base que permita, en posteriores trabajos similares, ordenar metodológicamente las etapas de reconocimiento del desempeño energético en un proceso y la metodología para la selección de indicadores de desempeño energético y su posterior implementación.

Se espera que esta guía permita fomentar una cultura organizacional de ahorro energético, a través de la construcción de indicadores que lleve a las industrias a la sostenibilidad y optimización de sus recursos energéticos y de sus procesos.

El objetivo principal de este documento es aportar las pautas, recomendaciones y referencias que permitan al personal encargado del área energética de las organizaciones aplicar criterios comunes y procedimientos coherentes para la identificación de áreas, equipos o procesos críticos energéticamente. De igual forma, se propone una metodología para la selección e implementación de indicadores de desempeño energético que permitan controlar los consumos energéticos tomando como caso de estudio el proceso de elaboración de azúcar de los ingenios.

Llegar a esta guía metodológica conlleva una historia conexa dentro de las realidades académicas, empresariales y de estado en nuestro país, este contexto se describe en el capítulo uno.

El segundo capítulo incluye una serie de parámetros a evaluar y analizar para la identificación de las áreas, procesos y equipos críticos energéticamente en las organizaciones de tipo productivo. De igual forma, se explica de manera muy breve la funcionalidad

que cumplen los indicadores energéticos como herramientas para conocer la variabilidad del consumo en estas áreas críticas y sus posibles causas. Por último, describe el tipo de indicadores energéticos a tomar como referencia de acuerdo con la producción, y explica en qué contexto es favorable hacer uso de uno u otro.

El tercer capítulo expone la metodología para la construcción de indicadores de desempeño energéticos en procesos continuos y discontinuos y las estrategias para el seguimiento de procesos, equipos o áreas críticas.

El cuarto capítulo presenta la aplicación de las herramientas expuestas en los capítulos previos, tomando como caso de estudio el proceso productivo de obtención de azúcar.

El quinto capítulo muestra un nuevo panorama para futuras investigaciones en el campo ambiental. El caso de estudio sobre el comportamiento del material particulado emitido en una caldera bagacera, permite extender las fronteras del MGIE a la evaluación de indicadores ambientales, como herramienta para estudios de impacto ambiental.

CAPÍTULO 1
Trayectoria en I+D+I en gestión de la energía en Colombia

Omar Prías Caicedo

La trayectoria de la gestión de la energía en Colombia es resultado de la alineación de actores académicos, estatales y productivos. Al finalizar la década de los noventa, el sistema energético colombiano se encontraba en proceso de consolidación luego de sufrir importantes cambios, como la adopción de una nueva estructura de mercados, la diversificación de la matriz de energéticos primarios, la penetración de nuevas tecnologías en la industria y requerimientos de incrementos en productividad en ambientes competitivos como consecuencia de la apertura económica.

Este panorama representaba retos y oportunidades de investigación, desarrollo tecnológico e innovación para el país, que debían ser atendidos por los grupos de investigación, entidades e industrias pertenecientes al Sistema de Ciencia Tecnología e Innovación. Pese a que se estaba generando una línea crítica importante para abordar este escenario, era notable la necesidad de coordinación y generación de canales adecuados de comunicación para aprovechar las potencialidades existentes.

Para responder a este entorno, en el 2003 se creó la Red Colombiana de Investigación en Eficiencia Energética - RECIEE, conformada por doce grupos de investigación y apoyada por Colciencias. La red estableció los siguientes objetivos:

- Identificar líneas de investigación y coordinar actividades para su fomento y desarrollo en coordinación con Colciencias y entidades relacionadas
- Impulsar y coordinar la formación avanzada: maestrías y doctorados
- Apoyar la movilidad de investigadores y participar en redes internacionales
- Promover la creación de publicaciones indexadas
- Coordinar la creación de normas y reglamentos técnicos sobre eficiencia energética para equipos de uso final y gestión energética

- Organizar eventos académicos de carácter científico y tecnológico
- Promover la creación de incentivos a las investigaciones

Las actividades desarrolladas por la RECIEE incluyeron la organización de las tres primeras versiones del Congreso Internacional sobre el Uso Racional y Eficiente de la Energía –CIUREE– en los años 2004, 2006 y 2008, bajo el liderazgo del Grupo de Investigación en Eficiencia Energética y Energías Alternativas –GEAL– de la Universidad Nacional de Colombia sede Palmira; Grupo de Investigación Conversión de Energía –CONVERGIA–, de la Universidad del Valle, y el Grupo de Investigación en Energías –GIEN–, de la Universidad Autónoma de Occidente.

Los CIUREE (Congreso Internacional sobre uso racional y eficiente de la energía) tuvieron como objetivo principal el encuentro de académicos, científicos, ingenieros, fabricantes y empresas del sector energético nacional e internacional, con el fin de presentar avances recientes del uso racional y eficiente de energías renovables y no renovables, intercambiar experiencias, así como también analizar la reducción del impacto ambiental mediante los sistemas energéticos eficientes que contribuyeran al desarrollo sostenible.

Los ejes temáticos manejados para las diferentes versiones del congreso fueron:
- Generación, transmisión y uso eficiente de la energía
- Combustibles y eficiencia energética
- Gestión y administración de la energía
- Energía y medioambiente
- Energías renovables

La experiencia de la red y los CIUREE se alineó con iniciativas desde diferentes sectores, lo que generó insumos que sustentaron bases sólidas para la promoción de la gestión de la energía en Colombia. Las líneas de investigación y las discusiones generadas extendieron las redes de trabajo al campo estatal y al sector industrial.

Sabía que...

La Red Colombiana RECIEE ya ha realizado cuatro congresos internacionales sobre uso racional y eficiente de la energía (tres en Colombia y uno en México).

Especialmente con el trabajo desarrollado en la línea de gestión y administración de la energía se identificó la necesidad de crear un modelo de gestión que alineara los nuevos conceptos sobre eficiencia y productividad con las herramientas de gestión existentes, en pro de la competitividad nacional.

Esa así como en Colombia se han desarrollado lineamientos y modelos en gestión energética trabajados en el sector empresarial, siendo los más representativos:

1. Modelo de control del consumo energético de la Universidad Pontificia Bolivariana (UPB).
2. Modelo de mejora continua de la eficiencia energética del Grupo de Gestión Energética de la Universidad del Atlántico.
3. Modelo de gestión integral de la energía, desarrollado por los Grupos de Investigación de Gestión Energética de la Universidad del Atlántico y el Grupo de Investigación en Energía de la Universidad Autónoma de Occidente.
4. Experiencias particulares en gestión energética en industrias e investigaciones y acciones relacionadas en universidades en Colombia.
5. Investigación *Gestión integral de la eficiencia energética en ambientes competitivos - Modelo EPRI*, Omar Prías.

Recogiendo los aspectos más representativos de los modelos, en el 2007 se estructura el SGIE (Sistema de Gestión Integral de la Energía) y se desarrolla una iniciativa conjunta con la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) y Colciencias, para la aplicación del modelo SGIE en el sector empresarial.

La iniciativa se complementó con el desarrollo del PEN-SGIE (Programa Estratégico Nacional, Sistemas de Gestión Integral de la Energía, PEN-SGIE), desarrollado entre el 2010 y el 2013, que generó actividades de sensibilización y promoción de sistemas de gestión de la energía como innovación organizacional para las empresas. El programa contó con financiación y participación de la UPME, Colciencias y cinco empresas de energía del país, y en su ejecución participaron quince universidades de cinco regiones del país. Entre los resultados del PEN-SGIE se logró el desarrollo de actividades tendientes a la implementación del SGIE en cincuenta empresas a nivel nacional.

Paralelamente, desde el año 2008, el Comité Técnico de Normalización 228 de ICONTEC en Sistemas de Gestión Energética, elaboró la Norma Tecnica Colombiana NTC 242-para la implementación en Colombia de la ISO 50001.

El panorama se ha complementado con un marco de políticas en donde el uso de la energía ha ido acentuando paulatinamente su papel. Bajo la sombrilla de la Ley 615 de 2001, que establece el uso racional y eficiente de la energía como asunto de interés nacional, se ha gestado un panorama legal donde resalta la adopción del Plan de Acción Indicativo del Programa de Uso Racional y Eficiente de la Energía (PROURE) en el 2010. Entre los componentes del programa se estructuró un subprograma con ocho líneas de acción

para el sector industrial, que incluía una específica para la gestión integral de la energía en la industria, con énfasis en producción más limpia. En cuanto a los subprogramas estratégicos se cuenta con el de educación y fortalecimiento de capacidades en investigación, desarrollo tecnológico e innovación- I+D+I y gestión del conocimiento, que apoya también esta área.

Sumados estos antecedentes, la gestión energética en Colombia se acerca a una década construyendo trayectorias desde la investigación, el desarrollo tecnológico y la innovación en conjunto universidad, Estado e industria, anticipándose a los nuevos enfoques y estrategias internacionales, en busca de nuevas oportunidades de competitividad para la industria.

CAPÍTULO 2
¿Cómo identificar áreas críticas energéticas en las empresas? ¿Cuál es la funcionalidad de los indicadores de desempeño energéticos en estas áreas?

Judith Rodríguez Salcedo
Natalia Perea Velasco
Jenny Lorena Ibargüen Valverde

En las organizaciones todos los procesos productivos demandan energía para su operación, algunos con mayor o menor consumo, lo que depende generalmente de la capacidad y eficiencia de los equipos asociados. El conocer la distribución de este consumo al interior de las organizaciones se convierte en un punto de partida para la identificación de áreas y procesos críticamente energéticos por su consumo. No obstante, es importante resaltar que las áreas de mayor consumo no siempre son las áreas críticas, para ello también se deben evaluar procesos con consumos inestables en el tiempo, desbalanceados e ineficientes en términos de masa y energía y generadores de volúmenes de pérdidas de masa y energía significativos durante todo el proceso productivo.

En términos energéticos, aunque las organizaciones presenten estandarización en sus procesos, siempre se encuentran diferentes factores que conducen a que surja variabilidad en la demanda de energía. Sin embargo, cuanto más conocimiento y control se tenga sobre el proceso probablemente la variabilidad será menor. Por ello, el medir, seguir y controlar los consumos de energía a través de indicadores de desempeño energético se convierte en una herramienta clave para evaluar la eficiencia en la productividad de las organizaciones en términos energéticos. No obstante, existen áreas, procesos y equipos críticos en los cuales el medir puede resultar difícil y costoso, por tanto será conveniente realizar chequeos en períodos que no sean ni muy cortos ni muy largos, en vez de seguimientos continuos. Toda medición, independiente de si

es continua o no, es efectuada para controlar o evaluar su comportamiento. Para eso es conveniente seguir los parámetros de selección.

1. Parámetros para la selección del área, proceso o equipo crítico a controlar energéticamente

Para la selección o determinación de las áreas, procesos y equipos críticos energéticos en una organización o proceso productivo, se debe realizar un diagrama de flujo másico y energético de estos, con el objeto de identificar y reconocer todas las áreas, procesos y maquinaria presentes. Este esquema debe relacionar cada uno de los siguientes aspectos:

a) Las áreas que conforman la organización, entre ellos los procesos productivos y los servicios industriales.
b) Los flujos de entradas y salidas, materias primas, productos y residuos necesarios para elaborar los balances de masa y energía del proceso y por etapas.
c) El tipo de energéticos primarios y secundarios asociados a cada una de las operaciones unitarias (energía eléctrica, gas natural, diésel, entre otros), como energéticos primarios, y vapor o agua a diferentes temperaturas, como energético secundario.
d) Consumos energéticos de cada una de las áreas (historial estadístico o medición).
e) Especificación de equipos.
f) Capacidad de producción.
g) Áreas en las cuales la inestabilidad del energético repercute en la calidad del material.

Cuando se tiene el esquema energético productivo de la organización, con cada uno de los consumos asociados, ya sea que se hayan determinado por historial estadístico o por medición en un tiempo de diagnóstico, se procede a la identificación de las áreas de mayor consumo, para lo cual se realiza un gráfico de Pareto con dicho consumo.

Recuerde que…

Un diagrama de Pareto es un gráfico de barras similar a un histograma, que se conjuga con una ojiva o curva de tipo creciente y que representa en forma descendente el grado de importancia o peso que tienen los diferentes factores que afectan el área, proceso o equipo.

Una vez identificada el área de mayor consumo y el área que requiere estabilidad en el consumo del energético, se seleccionan las áreas críticas a controlar para mantener la calidad y la cantidad del producto con el menor consumo. Para ello es recomendable que se seleccione el área que requiere mayor estabilidad del energético, en caso de que no se presente esta situación entonces se deberá seleccionar el área que muestre mayor consumo (Ilustración 1).

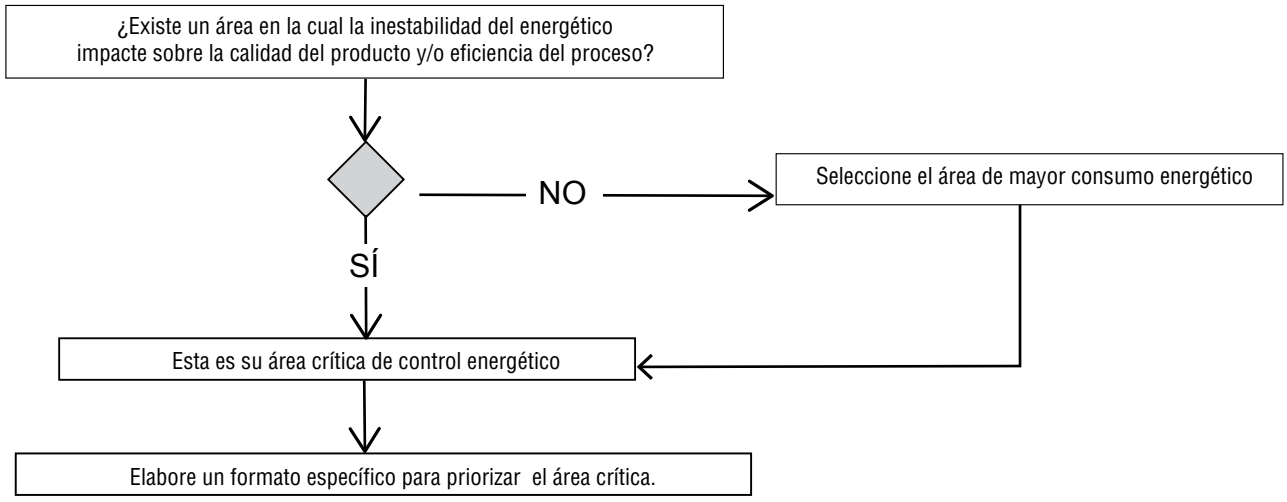


Ilustración 1. Selección de áreas críticas

Fuente: Autores.

Después de seleccionada el área crítica de control, el paso a seguir es hacer un reconocimiento del área y recopilar la mayor documentación técnica disponible sobre ésta. La información del área mediante la solicitud de documentación técnica y visitas al área debe recolectarse y registrarse en un formato que contenga como mínimo los datos que se indican en la Ilustración 2.

Con la información recolectada según el esquema de la Ilustración 2 quedará caracterizada el área crítica para aplicar el monitoreo de desempeño energético y posterior definición de medidas de gestión a considerar.

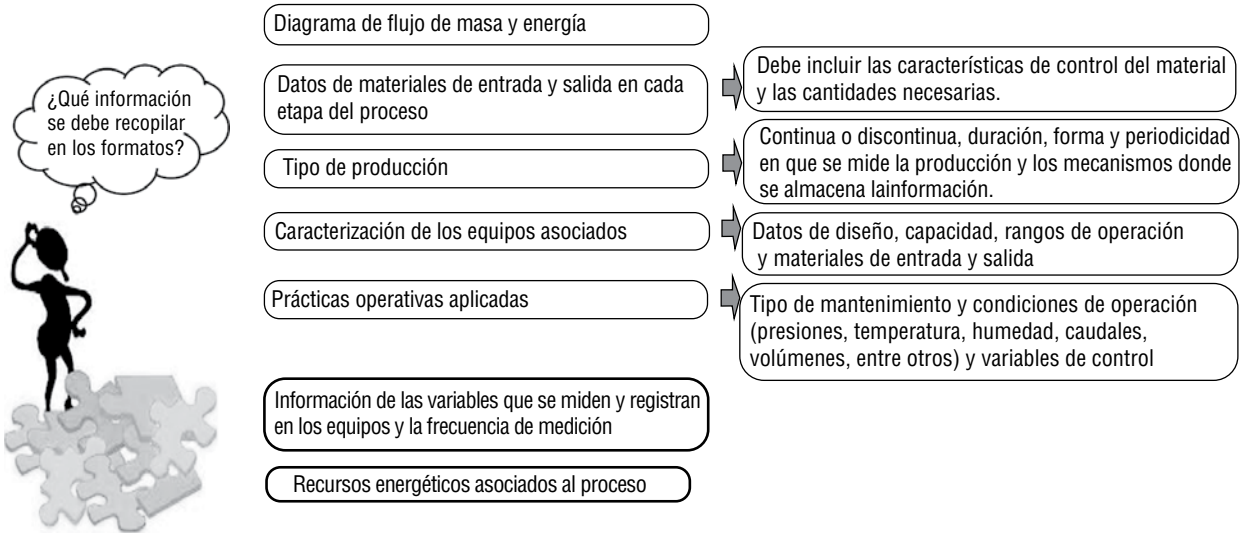


Ilustración 2. Información a recolectar en el área crítica para su caracterización

Fuente: Autores

2. ¿Qué son los indicadores de desempeño energético?

Los indicadores de desempeño energético (IDE) son datos fundamentales para la comparación entre procesos y actividades con situaciones similares. Sirven para monitoreo de control, supervisión de cambios en el rendimiento de la energía y reducción de pérdidas energéticas en cualquier proceso productivo, lo que permirte, a cualquier organización a través de gestión, establecer planes estratégicos para alcanzar metas a corto, mediano y largo plazo, así como obtener y mantener altos niveles de eficiencia energética.

¿Sabía que…

la adecuada implementación de indicadores de desempeño energético puede mejorar la capacidad energética productiva de cualquier organización?

Un indicador de desempeño energético debe determinarse con respecto a un indicador de referencia ya establecido denominado indicador lineal, e independiente de los niveles productivos; o de acuerdo con el comportamiento y método lineal estadístico entre la producción y el consumo. Su selección depende de la cantidad y calidad de la información disponible o de la facilidad para la toma de datos en la etapa de diagnóstico. Los elementos a tener en cuenta para la construcción de un indicador de desempeño energético (IDE) se describen en el Capítulo 3.

3. ¿Cómo se clasifican los indicadores de desempeño energético?

A. Indicadores de desempeño energéticos lineales e independientes del nivel productivo

Los indicadores energéticos lineales e independientes del nivel de producción son una expresión cuantitativa o cualitativa del comportamiento, acciones o mejoras de una industria, proceso o equipo en un determinado tiempo y con un nivel constante de producción. De igual manera constituyen una herramienta útil para fines de caracterizaciones iniciales, en las cuales se desea conocer e identificar cuáles son las áreas, equipos o procesos de mayor consumo de una organización; para finalmente implementar un sistema de medición y seguimiento de indicadores más robusto, que logre establecer un mejor control y veracidad de datos.

Se debe emplear IDE de procesos similares en otras empresas para la obtención del mismo producto para lograr un Benchmarking. Pero debe tenerse en cuenta que los valores pueden ser iguales, mayores o menores porque dependen del tipo de materia prima, de la tecnología con la que cuenta la empresa, la capacidad instalada, las características de los energéticos, entre otros, como se muestra en la Ilustración 3.

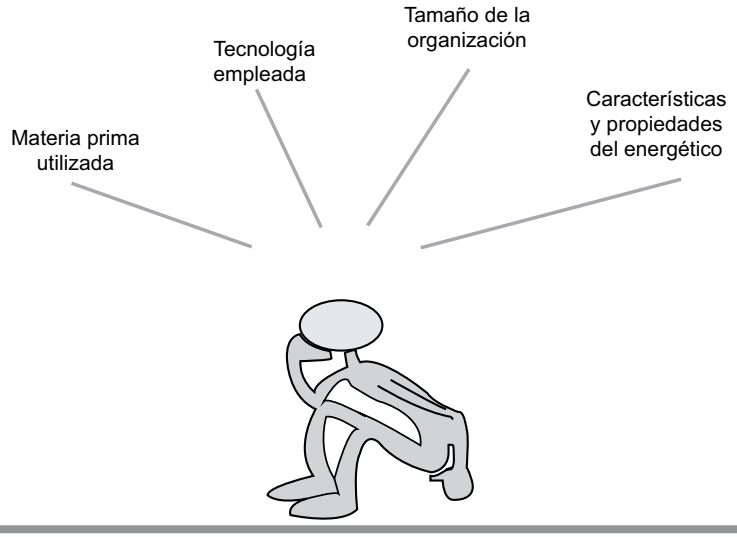


Ilustración 3. Aspectos a tener en cuenta en un Benchmarking

Fuente: Autores

B. Indicadores de desempeño energético asociados a la producción

Los indicadores de desempeño energético asociados a la producción son instrumentos de valoración energética que permiten determinar en qué medida la variación de los consumos energéticos está relacionada con variaciones en la producción y cuándo se está o no dentro de los niveles óptimos de operación. En Colombia, este tipo de estudios han sido liderados por las Universidades Autónoma de Occidente, del Atlántico y Nacional de Colombia, que en apoyo de la UPME y COLCIENCIAS han propuesto unas metodologías en el marco del Modelo de Gestión Integral de la Energía.

Recuerde que…

Cuando se comparan dos indicadores lineales e independientes de la producción, no es posible establecer si se está trabajando de forma "eficiente" o "ineficiente", solo es factible conocer el período en que se generan los incrementos y las disminuciones de energía.

Este modelo comprende como Indicadores de Desempeño Energético los siguientes: i) Índice de Consumo (IC), ii) Indicador Base 100 (IB100), y iii) Sumas Acumulativas (CUSUM), abajo descritas. Las metodologías han sido desarrolladas y probadas en el sector industrial colombiano por Campos, Prías, Quispe, Lora, entre otros (Campos *et al.,* 2008).

De manera previa a construir el indicador se debe graficar el consumo de energía en función de la producción con los datos históricos. Así se logra la ecuación lineal que refleja la dependencia entre la producción y su consumo de energía, y se obtiene una ecuación de la forma de la Ec 1, descrita en el Capítulo 3. El gráfico indica los potenciales de ahorro posibles para el proceso, sin necesidad de realizar cambios tecnológicos.

• Índices de Consumo (IC)

Usualmente reflejan el desempeño del área o empresa en función de la producción, mediante una curva con función potencial en la que a medida que la producción disminuye es posible que se reduzca el consumo total de energía, pero el gasto energético por unidad de producto aumenta. Esto a consecuencia de que crece el peso relativo de la energía no asociado a la producción respecto a la energía productiva.

• Indicador de Eficiencia Base 100 (IB 100)

Este indicador muestra el estado y la variación de la eficiencia energética de los procesos en el período operativo, facilita el análisis y generación de planes de acción en función de las mejores prácticas energéticas.

• Indicador de Tendencia o Sumas Acumulativas (CUSUM)

Este indicador permite monitorear la tendencia del proceso en cuanto a la variación de sus consumos energéticos, con respecto a un período de y frente a la energía que debería consumirse por tendencia para el mismo valor de producción. A partir de éste también es posible determinar cuantitativamente la magnitud de la energía que se ha dejado de consumir o se ha sobreconsumido hasta un momento dado.

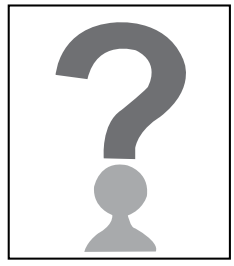
¡Atención!

En Colombia, la Unidad de Planeación Minero Energética –UPME–, dispone de una serie de indicadores de consumo energético para comparación y monitoreo de procesos, industriales, los cuales han sido establecidos en estudios e investigaciones, con el fin de que sean comparados por las diferentes asociaciones para la toma de decisiones y posterior reducción de consumos energéticos. Consultar http://www.upme.gov.co

4. ¿Cómo seleccionar el tipo de IDE acorde con el área, proceso o equipo crítico?

Es fundamental que el conjunto de indicadores de carácter energético u otros de cada proceso estén alineados entre sí, con el fin de lograr efectividad y eficacia en los objetivos. Para definir un buen indicador energético en un proceso es importante seguir los siguientes criterios orientados a responder seis preguntas básicas:

- ¿Es fácil de medir?
- ¿Se mide rápidamente?
- ¿Proporciona información relevante en pocas palabras?
- ¿Se puede monitorear, hacer seguimiento fácilmente?
- ¿Genera alto beneficio y poca inversión implementarlo?
- ¿Miden con alto grado de precisión los resultados alcanzados y los desfases con respecto a los objetivos propuestos?



Si todas las respuestas son positivas, se puede afirmar que ya está definido un correcto indicador.

5. Aplicación, verificación y seguimiento del indicador

Una vez se establece el indicador en un área, proceso o equipo, es importante verificar su validez, es decir que permita controlar las variables que afectan directamente el consumo de energía representada en la mayor o menor cantidad de recurso energético.

Realizar el seguimiento de los IDE implica el establecimiento de un procedimiento de control energético, que incluye elementos tales como el análisis, comparación y evaluación de datos de consumo energético, revisión de metas y estimación de ahorros y mejoras. Como mecanismo de control se instituye la creación de hojas de registros de datos que faciliten la inspección del comportamiento del área o proceso en estudio. En las hojas de registros será posible generar de forma automática las gráficas de control para observar fácilmente el desempeño diario de la línea de producción, en cuanto al índice de consumo energético. Además, al final de cada mes se tendrá disponible el consolidado de este indicador, así como el de los costos unitarios por energía. Una propuesta de formato se muestra en la Tabla 1.

Recuerde que…

Independientemente del tipo de indicador de desempeño energético a utilizar, su análisis deberá estar fundamentado en la relación entre el nivel productivo tecnológico y factores tales como cambios en el precio, en el proceso (infraestructura, producción, equipos, calidad del energético y de la materia prima), que influyen en la tendencia de consumo del energético y que explican el porqué de la variación del indicador en el tiempo.

Tabla 1. Hoja de Registro-Indicadores de Desempeño Energético IDE

Hoja de registro indicadores de desempeño energético (I.D.E.) MES _____del año_____								
Área: _____Proceso:_____Turno:_____								
Equipo (Si corresponde):_____Otro ¿Cuál?_____								
Día	Hora de medición	Consumo energético	Producción	ICDiario	ICMeta	Variables de control		Otro Indicador Ejem. (Consumo/Tiempo
1	8:00					Presión	Temperatura	
3								
31								
Total								
Paradas								
Mecánicas	Eléctricas		Proceso	Otras		Cambios		
Día-Descripción	Día-Descripción		Día-Descripción	Día-Descripción		Día-Descripción		

Fuente: Autores.

CAPÍTULO 3
Metodología para la construcción y seguimiento de un indicador de desempeño energético

Judith Rodríguez Salcedo
Natalia Perea Velasco
Jenny Lorena Ibargüen Valverde

Conforme a lo indicado en el capítulo anterior, los indicadores de desempeño deben ser herramientas que provean un valor de referencia a partir del cual se describe qué tan eficientemente se consume la energía del área, proceso o equipo crítico en un momento dado, con el fin de tomar las acciones necesarias para alcanzar el consumo mínimo esperado.

La construcción e implementación de un indicador de desempeño energético se basa en conocer la dinámica y los niveles de producción, la eficiencia de la tecnología con la que cuenta el área, el proceso o equipo crítico y los recursos necesarios para su funcionamiento. Esta información permite evaluar el panorama del área crítica y establecer la metodología para determinar en función de qué variables se puede evaluar el consumo y el alcance que tendría el indicador de desempeño.

En este capítulo se encuentran dos metodologías propuestas para la construcción de los indicadores de desempeño energético. Primero, la metodología propuesta para construir el indicador en un nivel de producción constante, y después se describe la metodología perteneciente al Modelo de Gestión Integral de la Energía (MGIE) para la construcción de un indicador de desempeño energético asociado a la producción.

Además, se ha consolidado una secuencia para la identificación de las variables de control a las cuales se puede hacer gestión para alcanzar los niveles óptimos de consumo energético, y se describe una serie de indicadores de rendimiento, los cuales al cruzar con estas variables permiten diagnosticar las posibles causas del mayor o menor desempeño. Estas variables se deben seguir en el tiempo para controlar el proceso.

Es importante considerar que existen áreas, procesos o equipos críticos que dado el alto costo de la medición energética, o lo poco oportuno de la información para tomar acciones inmediatas, deben de gestionarse a partir de mantener las variables en los niveles en los que se detecta impacto sobre el desempeño energético.

La información contenida en el presente capítulo tendrá una utilidad importante si se aplica la metodología acorde con cada situación, ya que no solamente servirá para tener información sobre el desempeño energético, sino que también hará posible la optimización permanente de los energéticos, para corregir las prácticas operativas inadecuadas.

1. ¿Cómo construir y seleccionar un IDE?

Identificada, reconocida y recopilada la información citada en el Capítulo 2, sobre el área crítica de control energético, y determinado el tipo de IDE requerido para evaluar esta área, el paso siguiente es determinar el parámetro bajo el cual se debe establecer el indicador. Para ello, se describen los pasos a seguir para la construcción del indicador, de acuerdo con el tipo de producción.

- **Construcción de indicadores de desempeño energético lineales e independientes del nivel de producción**

Los IDE lineales asociados a equipos o procesos que trabajan con un nivel de producción constante y que no presentan mediciones ni registros ya sean de consumo del energético o producción, corresponden a índices de consumos teóricos de referencia tomados de la literatura o datos del fabricante en caso de ser equipos (los cuales relacionan el consumo del energético con la producción). No obstante, se recomienda realizar una verificación del IDE de referencia con la medición y a su vez asociar el efecto que causa la oscilación de las variables del equipo o proceso sobre el IDE. Entre las variables a considerar se encuentran la calidad y características de los materiales, tipo y procedencia de insumos y suministros entrantes, parámetros de operación de los equipos, entre otros.

Para la verificación del IDE se debe identificar el tipo y características del energético y de la producción que relaciona el indicador. Luego, se procede a realizar un diagnóstico del área, proceso o equipo, para identificar, además del energético y la producción, el tipo de medición y registro que se tienen de estos, al igual que de las variables que se miden y controlan. Posterior a esto se deben hacer seguimientos para determinar el índice de consumo real y verificar así si es similar al reportado por la literatura. Durante los seguimientos es importante reportar:

a. Registro de los consumos energéticos asociados
b. Registro de la producción
c. Registro de los valores de las variables de medición y control
d. Prácticas operativas aplicadas
e. Caracterización de las materias primas e insumos alimentados

Dado que los IDE asociados a equipos o procesos que trabajan con un nivel de producción constante, generalmente no presentan mediciones ni registros, ya sean de consumo del energético o producción, se recomienda establecer a partir de los seguimientos los rangos en los cuales las variables y las prácticas de operación permiten que el índice de consumo sea aproximadamente igual al IDE. Esto con el objetivo de controlar los consumos a partir de la operación eficiente del proceso, lo cual se logra a través de la estandarización en el funcionamiento del mismo.

- **Construcción de indicadores de desempeño energético asociados a la producción**

A continuación se describen las herramientas estadísticas propuestas en el MGIE, para la construcción del indicador de desempeño en función de la producción.

I. ***Modelo matemático que relaciona el consumo energético y la producción***

El primer paso consiste en determinar el modelo matemático que correlaciona con claridad el consumo del energético en función de la producción. Por tanto, permite identificar si el modelo es válido o no, e igualmente definir la influencia de factores cuantitativos productivos del área crítica sobre los consumos energéticos.

La metodología a seguir para establecer el modelo matemático consiste en:

- Seleccionar los datos de los consumos de energía y producción ubicados en un mismo punto de tiempo para confrontarse.
- Generar un gráfico de dispersión del consumo de energía en función de la producción, mediante el método de los mínimos cuadrados, aplicando el criterio de mínimo error cuadrático (R^2).
- La determinación del valor de R^2 aceptable se puede considerar dependiendo de lo que se está evaluando. Si se trata de una empresa un valor de R^2 de 0,6 se puede denominar aceptable, pero si es un equipo debe ser mayor de 0,85. Si estos criterios no se cumplen se debe evaluar la posibilidad de filtrar datos atípicos (No >10% de la muestra) y recalcular el modelo y la correlación, pero si aún así este no es alcanzado se debe evaluar el por qué; y si es necesario aplicar el método de la producción equivalente, en donde sólo se tenga en cuenta la energía que corresponde al proceso, equipo o área; y en el que se conviertan las partes en cada fase del proceso al equivalente en producto terminado.

El modelo matemático que define la ecuación de la línea base energética del equipo, área o proceso, se conoce como línea base, y a partir de ella se pueden calcular analíticamente la pendiente y el intercepto de la recta; la función se expresa de la siguiente forma:

$$E = mP + Eo \qquad (1)$$

Donde:

E: Consumo de energía en el período seleccionado.
P: Producción asociada en el período seleccionado.
m: Pendiente de la recta que se interpreta como la razón de cambio medio del consumo de energía respecto a la producción.
Eo: Intercepto de la línea en el eje vertical que se interpreta como la energía no asociada a la producción.
mP: Es la energía utilizada en el proceso productivo.

II. ***Generación del gráfico de desempeño energético asociado a la producción***

Calculada la línea base, se debe hallar el Índice de Consumo (IC) teórico y real. El índice de consumo teórico corresponde al indicador de desempeño energético y se calcula a partir de la relación entre la energía teórica (calculada a partir de la línea base) y la producción, mientras que el índice de consumo real corresponde al indicador energético de un momento dado.

Obtenidos los valores de índice de consumo teórico y real, se construye la curva de desempeño energético a partir de la gráfica de IC, en función de la producción. La evaluación del desempeño energético del área crítica en un momento dado se representa con el punto en el gráfico de desempeño y, dependiendo de su ubicación, se determina el nivel de eficiencia o ineficiencia que presenta, asociado a la producción y a la gestión (Ilustración 4).

Para aprender…

El método de la producción equivalente es un procedimiento matemático o algoritmo que se basa en establecer factores de conversión energética a través de la cuantificación de variables que no han sido tenidas en cuenta en el proceso, área o equipo, y que influyen sobre el consumo de energía.

La gráfica de desempeño energético se realiza después de haber obtenido el gráfico E Vs. P y la ecuación, E = mP+Eo. Según la Ecuación 1, con un nivel de correlación significativo. El gráfico IC Vs P es una línea curva con asíntota en el eje de las abcisas (x), en el valor de la pendiente m de la expresión E (p). La expresión de la curva se obtiene de la siguiente forma:

$$E = mP + Eo \qquad (1)$$

$$IC = E / P = m + Eo / P \qquad (2)$$

$$IC = m + Eo / P \qquad (3)$$

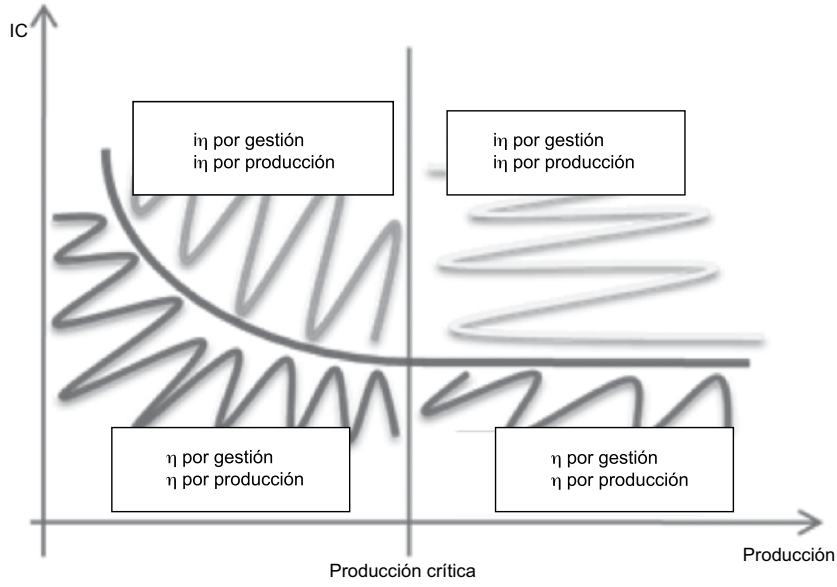


Ilustración 4. Tipo eficiencia e ineficiencia del proceso asociado a la producción

Fuente: Perea *et al*, 2013.

2. ¿Cómo identificar los parámetros de medición y control que impactan en el comportamiento del IDE?

La demanda final de la energía en los procesos productivos se encuentra en función del nivel tecnológico que presentan, de su esquema productivo y de las prácticas operativas y de manufactura aplicadas. Por ello, el estudio del comportamiento de los consumos energéticos, asociado al estado como operan el área, equipos o proceso, es un componente esencial del análisis global de éste.

A continuación se describen dos metodologías para el análisis e identificación de parámetros que impactan los consumos energéticos dependiendo de si es el área crítica la que involucra procesos continuos o discontinuos.

A. Procesos continuos

Los procesos continuos son aquellos procesos de producción que funcionan en forma permanente sin detenciones, excepto por reparaciones o mantenimientos de los equipos para permitir el alto rendimiento. Por lo cual, se supone su consumo energético debe ser constante a través del tiempo. No obstante, como consecuencia de la variación de los niveles de producción, estado de los equipos por su período de operación o técnica bajo la cual se operan, estos consumos pueden presentar una oscilación del indicador, como se muestra en la Ilustración 5.

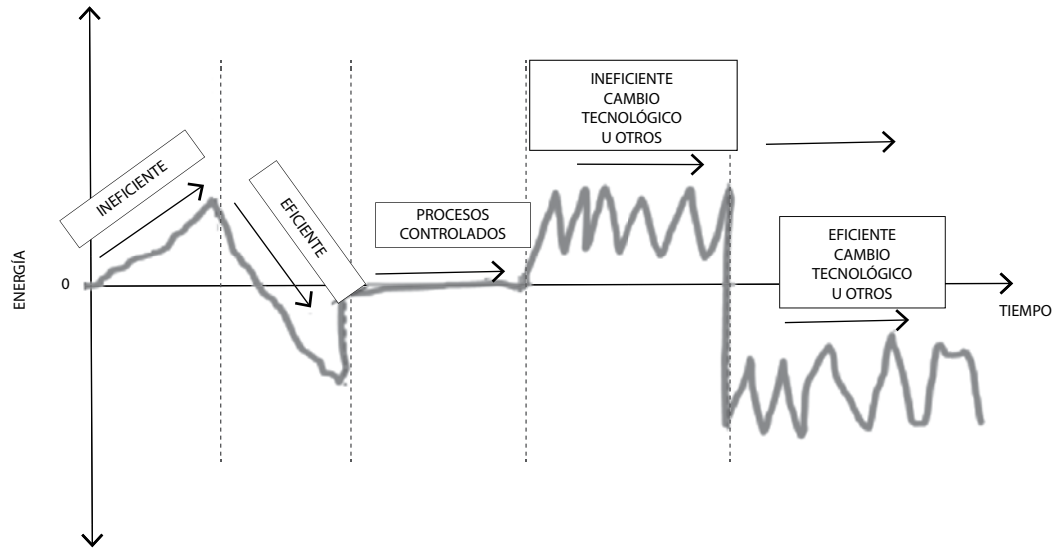


Ilustración 5. Tendencias o sumas acumulativas

Para ello, el gráfico de tendencia o sumas acumulativas (CUSUM) es una herramienta que monitorea la tendencia del proceso en cuanto a la variación de sus consumos energéticos, con respecto a un período base dado. A partir de él, también puede determinarse cuantitativamente la magnitud de la energía que se ha dejado de consumir o se ha sobreconsumido hasta el momento de su actualización (Campos *et al*, 2008).

Este gráfico relaciona el consumo de energía teórico para una producción dada, con respecto a la que realmente se consumió, y la suma acumulativa de la diferencia entre ellas indica la tendencia del área crítica a lo largo del tiempo. Cuando la tendencia es ascendente el área crítica está siendo energéticamente eficiente, pero cuando desciende, ésta es ineficiente. Pero si su comportamiento es constante se tiene la evidencia para decir que el proceso se controla en relación con el consumo energético. No obstante, si las variaciones oscilan por encima del valor de cero, es a consecuencia de una ineficiencia asociada a un cambio tecnológico, de materia prima, reestructuración del proceso, entre otros que impactaron en un mayor consumo, pero si la oscilación es por debajo de cero esos cambios condujeron a la mejora de la eficiencia y es cuando se debe realizar un nuevo ajuste de la función que determina la línea base (Ilustración 5).

Este gráfico es una herramienta que también puede ser utilizada para cruzar con la información correspondiente a los valores de las variables de proceso que impactan el consumo y establecer los rangos en los cuales deben permanecer esas variables, con el fin de mantener los mínimos consumos de energía. Para ello se debe graficar en un eje secundario vertical los valores obtenidos de las variables a las que se les realizó seguimiento durante el tiempo del indicador.

B. Procesos discontinuos

Los procesos discontinuos son aquellos que producen ciertas cantidades de producto a intervalos regulares, generando productos homogéneos. Este tipo de procesos, como se explicó anteriormente, pueden ser evaluados bajo un índice de consumo comparable con un IDE de referencia para determinar las variables y los parámetros a controlar que impactan el consumo energético y afectan la calidad del producto, como se muestra en la Ilustración 6. Las variables y los parámetros identificados como críticos se convierten en las variables de respuesta a evaluar de manera indirecta los consumos energéticos.

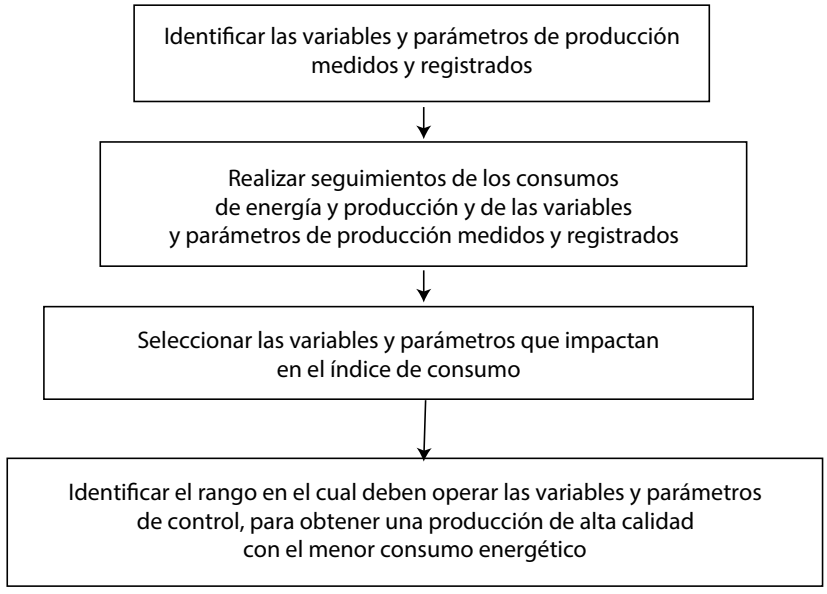


Ilustración 6. Identificación de variables y parámetros críticos

3. Estrategias para el seguimiento del proceso, equipo o área crítica

El éxito para identificar las variables y parámetros de control energético de los procesos, equipos o áreas depende del objetivo y la rigurosidad del seguimiento, el cual a su vez depende de la buena planeación del mismo. A continuación, en la Tabla 2 se detallan cada una de las estrategias a tener en cuenta al momento de planear un tipo de seguimiento.

Tabla 2. Estrategias para el seguimiento del proceso de IDE

Esquema de estrategias	
	Planeación del seguimiento del proceso, equipo o área Importante por: permitir tener el plan de trabajo preparado al momento de iniciar el seguimiento y gestionar los requerimientos de equipos y materiales necesarios para el desarrollo de un buen seguimiento.
	Conocimiento del proceso, equipo o área Importante por: permitir entender el objetivo y relevancia del proceso, equipo o área crítica en todo el proceso productivo.
	Reconocimiento del nivel tecnológico, productivo y energético del proceso, equipo o área Importante por: permitir identificar el movimiento del flujo de materiales y energéticos en el proceso, equipo o área, asociando cada uno de los flujos al proceso productivo global.
	Toma de datos de las variables y parámetros medidos y controlados del proceso, equipo o área Importante por: permitir identificar el nivel y método de instrumentación y medición existente, focalizando los puntos a registrar datos y si se requieren equipos, instrumentos o utensilios para medir o tomar muestras durante los seguimientos.
	Manejo estadístico de los IDE relacionándolos con cambios eventuales en el proceso o la empresa.
	Identificación y registro de hallazgos para la implementación de medidas enfocadas a la mejora continua.

Fuente: Autores

La obtención de la información pertinente para la identificación de impactos o sucesos asociados al proceso, equipo o área depende del seguimiento minucioso llevado en el proceso. No obstante, existen factores adicionales eventuales que impactan el dato registrado y su veracidad durante los seguimientos, como son:

- **Calibración de los equipos.** La correcta calibración de los equipos proporciona la seguridad de que los valores de la magnitud reportada por estos representan la magnitud medida, en la cual el error de la medición es inferior a los errores máximos tolerados.
- **Método de muestreo.** El muestreo durante el seguimiento se convierte en una herramienta clave cuando se requiere medición de variables o parámetros que normalmente no se miden ni se encuentran estandarizados durante el proceso, equipo o área crítica. Entre los factores asociados al método de muestreo se encuentran:
  - Mantener el mismo equipo de medición
  - Punto y tipo de muestreo
  - Homogeneidad de la muestra
- **Frecuencia de registro.** Es importante definir las frecuencias que permitan tener un panorama real del seguimiento. Por ello, es necesario encontrar la frecuencia mínima en la cual no se omita información que distorsione la realidad del seguimiento, pero que tampoco sean muchos datos que no tienen representatividad y cuyo análisis se vuelve engorroso.
- **Tipo de registro.** El registro de datos en los equipos de las variables que oscilan constantemente en el tiempo requiere ser medido de manera acumulada, dado que tomar un dato puntual como valor promedio del intervalo de un período no es representativo.

Recuerde que...

La realización de un buen seguimiento contribuye a una mejor predicción de los sucesos que impactaron en la ineficiencia de un índice energético en un momento dado, y así tomar las acciones necesarias para evitar que ocurran de nuevo.

Ejemplo de la producción equivalente en la industria metalmecánica[1]

Al realizar el gráfico de dispersión de consumo de energía eléctrica frente a la producción neta de varillas, se observa una débil correlación entre las variables con un R^2=0,0882, además de una elevada dispersión entre los datos. Esto se atribuye a lo siguiente: las varillas que han sido fabricadas a partir de palanquillas almacenadas y producidas en un período anterior, tendrán menor consumo energético eléctrico asociado que aquellas elaboradas en el mismo período y que han pasado por todas las etapas del proceso productivo; sin embargo, para el caso de la energía térmica el consumo será todo lo contrario, ya que cuanto menos tiempo de almacenamiento tengan las palanquillas, menor cantidad

[1] Para mejor comprensión de los términos revisar la referencia bibliográfica[2]

de energía será necesaria para alcanzar la temperatura deseada (1200 °C) para el siguiente proceso de laminación, esto debido a que las palanquillas que salen del proceso de solidificación a una temperatura de 600 °C, y que ingresan directamente a los hornos de calentamiento en el proceso de laminación, conservan más calor (lustración 7).

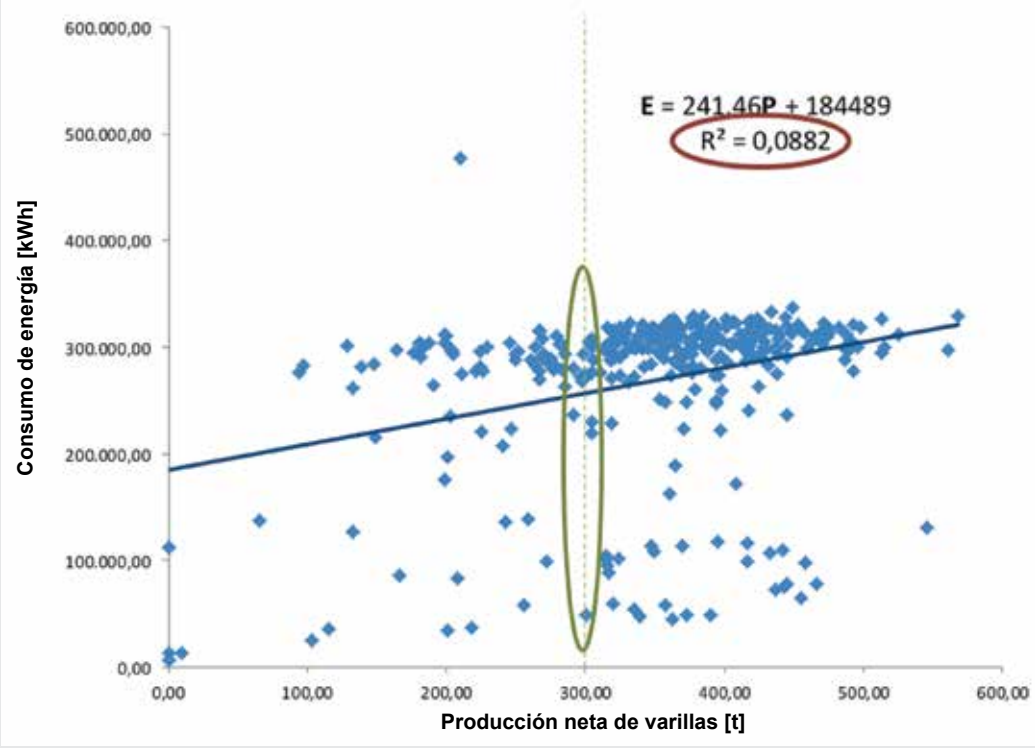


Ilustración 7. Dispersión de consumo de energía eléctrica frente a la producción neta de varilla

Fuente: Informe proyecto PEN:SGIE [13]

De acuerdo con lo anterior, es necesario estimar diariamente las toneladas equivalentes de palanquillas almacenadas, que intrínsecamente afectan el consumo energético de las varillas producidas, con el objetivo de estimar una línea de base energética que permita evaluar adecuadamente el desempeño energético en la planta.

Es por esta razón que resulta indispensable tener en cuenta la variación del inventario de palanquilla en la producción final, ya que al comparar los indicadores de desempeño con esta línea de base energética, claramente se obtendrán períodos de marcada eficiencia cuando se produzcan varillas a partir de palanquilla almacenada durante el día y períodos de marcada ineficiencia cuando las varillas sean producto de la chatarra al pasar por todas la etapas productivas. Dichos efectos pueden verse claramente en la Ilustración 7 (Círculo verde), en donde se observa elevada variabilidad en el consumo de energía, asociada a un mismo valor de producción.

La producción equivalente se estimó a partir de las ecuaciones 4, 5 y 6

$$P_{equivalente} = P_{laminación} + P_{equivalente}\,\Delta_{p.a} \quad (4)$$

$$P_{equivalente}\,\Delta_{p.a} = \Delta_{p.a} \times F_{c.e} \quad (5)$$

$$F_{c.e} = \frac{Consumo\ E.E.\ Palanquilla}{Consumo\ Total\ de\ E.E.} \quad (6)$$

Donde:

$P_{equivalente}$ = Producción equivalente

$P_{laminación}$ = Producción neta de laminación

$\Delta_{p.a}$ = Variación del inventario de palanquillas almacenadas

$\Delta_{c.e}$ = Factor de consumo energético de palanquilla

Es importante aclarar que:

La producción neta de laminación hace mención al total de varillas lisas obtenidas más las puntas de palanquillas, estas últimas debido a que son retornadas al proceso como alternativa de aprovechamiento y requieren una cantidad de energía eléctrica de los hornos para alcanzar el estado líquido.

El consumo de energía eléctrica de la palanquilla hace referencia a la cantidad de energía gastada para su elaboración.

Una vez se establece la producción equivalente, es posible determinar la línea de base del consumo de energía eléctrica como la relación lineal de mejor ajuste en un gráfico de dispersión de consumo de energía eléctrica frente a producción, como se observa en la Ilustración 8:

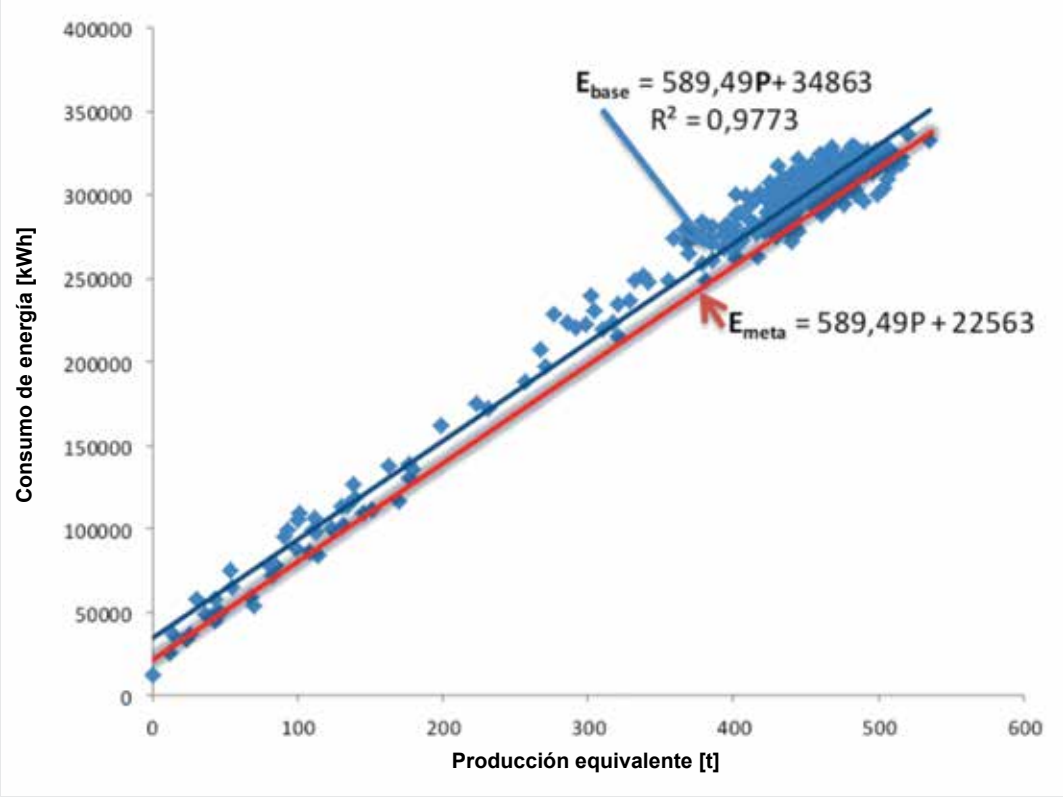


Ilustración 8. Dispersión de consumo de energía frente a producción equivalente

Fuente: Informe proyecto PEN:SGIE [13]

CAPÍTULO 4
Caso de estudio: ingenios azucareros

JUDITH RODRÍGUEZ SALCEDO
NATALIA PEREA VELASCO

En este capítulo se presenta con un ejemplo práctico del proceso de elaboración de azúcar, la aplicación de la metodología para la selección de áreas críticas, identificación del tipo de indicador de desempeño energético pertinente a utilizar de acuerdo con el área, la construcción del mismo y una fase de experiencias logradas mediante su seguimiento. La información consignada en este capítulo hace parte de los resultados del proyecto *Precaracterización energética de los ingenios azucareros como estrategia para el desarrollo de un programa de producción asociado al consumo de energía* (Perea y Rodríguez, 2013).

1. Proceso productivo para la elaboración de azúcar

El proceso productivo del azúcar está constituido básicamente por diez etapas después de cosechada la caña, estructuradas según lo indica la Ilustración 9.

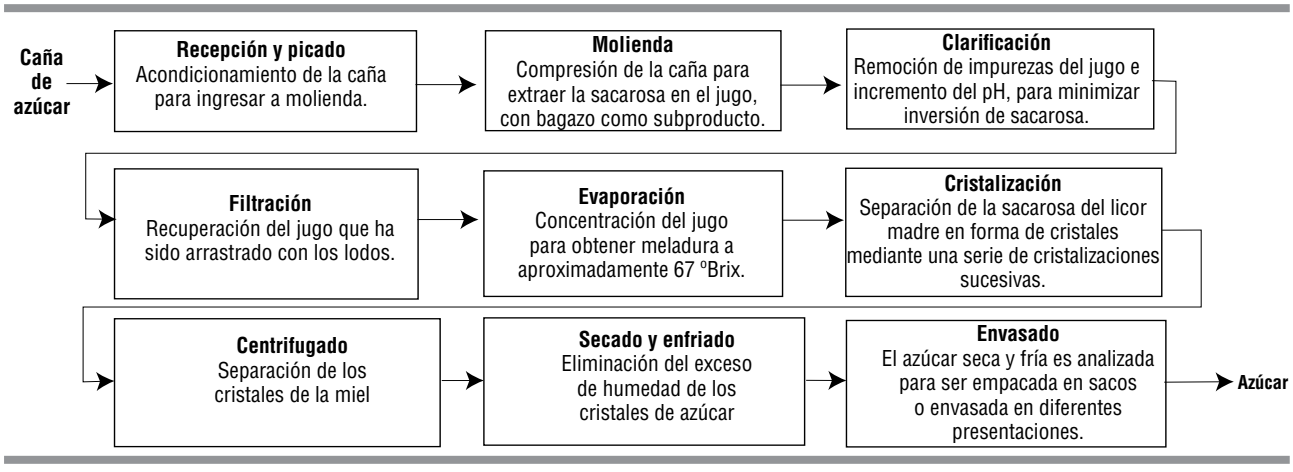


Ilustración 9. Proceso productivo del azúcar

Para la obtención de azúcar los ingenios utilizan como energético primario combustibles para alimentar la caldera, ya sea bagazo, carbón o una mezcla de ellos. El vapor como energético secundario, generalmente alimenta un turbogenerador el cual genera energía eléctrica y vapor de escape, este último es dirigido a los procesos de calentamiento y evaporación. Mientras que el vapor vegetal resultante en evaporadores es alimentado al proceso de cristalización (Ilustración 10).

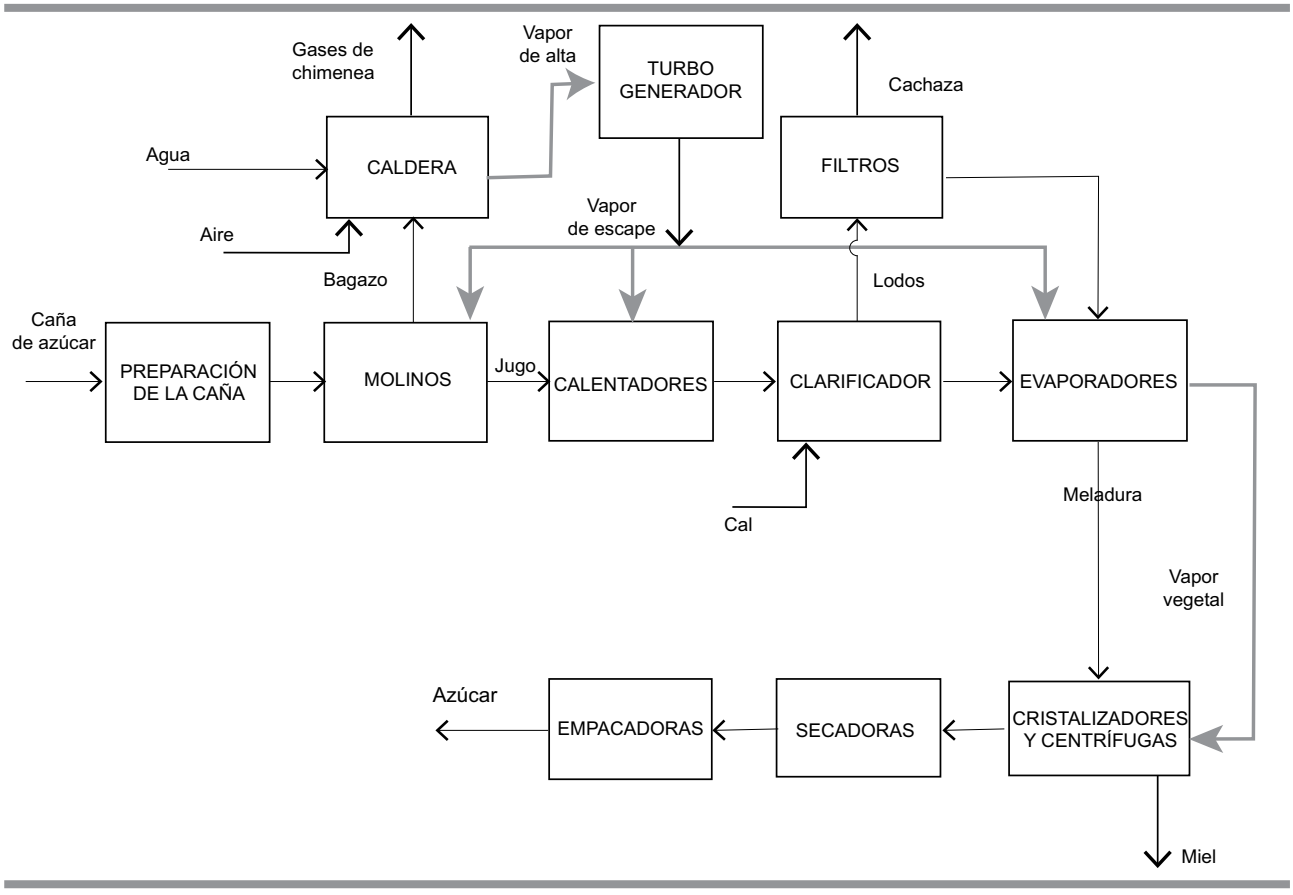


Ilustración 10. Proceso energético productivo del azúcar

2. Identificación de procesos críticos de control energético

El proceso productivo del azúcar tiene como energético primario el bagazo residual de molienda y el área de generación de vapor como su área crítica (las calderas). Para esta área se realizó el diagrama de Pareto del consumo de energía de los equipos asociados que corresponden a las calderas y se seleccionó la caldera A por presentar el mayor consumo de bagazo (alrededor del 64% del bagazo total consumido) que corresponde a 450 millones de libras de bagazo/año (Ilustración 11).

Por otro, lado se seleccionó el área crítica de control del energético secundario correspondiente al vapor; para este caso el método utilizado fue generar una matriz cualitativa fundamentada en la ponderación de las características que impactan en el consumo y estabilidad del energético (Ilustración 12).

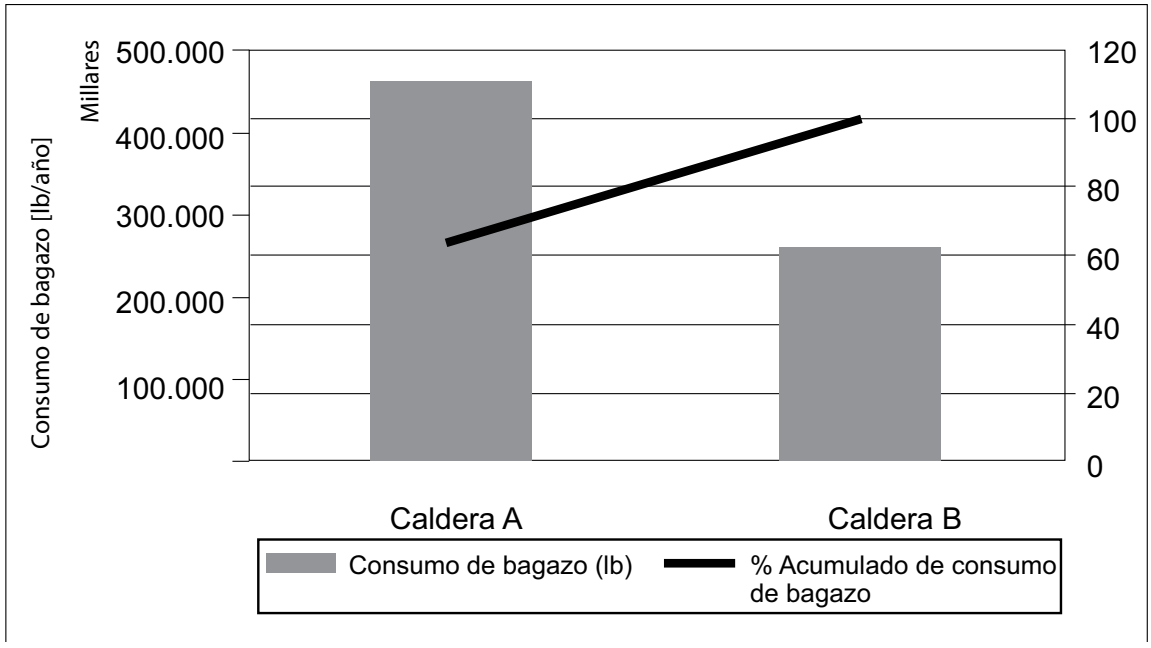
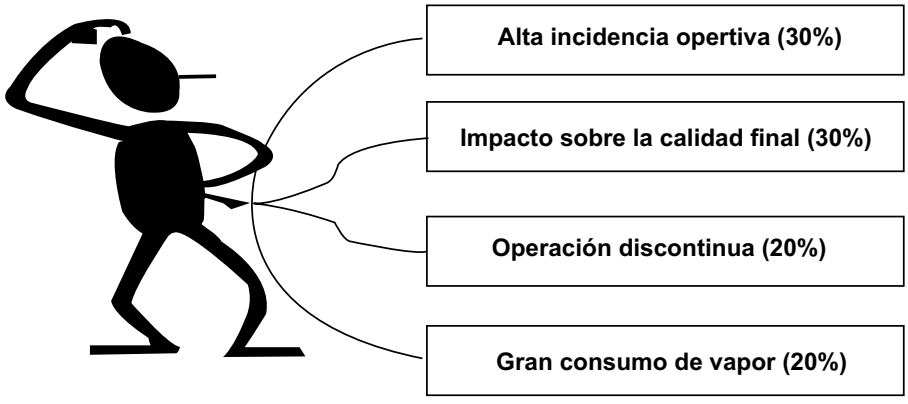


Ilustración 11. Diagrama de Pareto: Consumo de bagazo en las calderas del ingenio piloto



lustración 12. Características que impactan en el consumo y estabilidad del recurso energético en el área de cristalización

Como área crítica de control del energético secundario se seleccionó el proceso de cristalización. Aunque éste presenta un bajo consumo de vapor vegetal, desde el punto de vista de operación, esta área debe operar con un alto nivel de control, reflejado en el mayor puntaje con 4,2, en comparación con evaporadores y calentados, con puntajes de 2,8 y 2,1, respectivamente (Tabla 2).

Tabla 2. Impacto energético sobre los procesos críticos a controlar

Característica	Ponderación	Calentamiento	Evaporación	Cristalización
Impacto sobre la calidad final del azúcar	30%	4	3	5
Alta incidencia operativa	30%	1	3	5
Gran consumo de vapor	20%	2	4	1
Operación discontinua	20%	1	1	5
Total	100%	2,1	2,8	4,2

Nota: Siendo 1 el valor de menor impacto y 5 el de mayor impacto.

3. ¿Cómo identificar el tipo de indicador y variables a controlar?

Área de generación de vapor (caldera A)

La caldera –equipo donde se lleva a cabo el proceso de combustión– presenta como energético el bagazo y el vapor como producto, por ello el IDE a seleccionar debe asociar los consumos de bagazo y vapor generados (Ilustración 13).

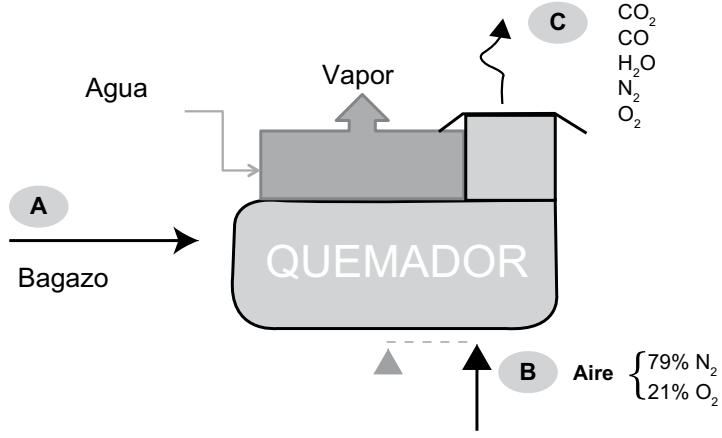


Ilustración 13. Entradas y salidas de materiales en la caldera

Después de recolectar la información referente a las características del equipo y del área de generación de vapor, se define que el IDE debe estar en términos consumo de bagazo y producción de vapor, y por contarse con datos diarios el IDE debe estar asociado a la producción. En la Ilustración 14 se encuentran algunas de las variables operativas y parámetros que se deben verificar durante la operación de la caldera y en el combustible utilizado.

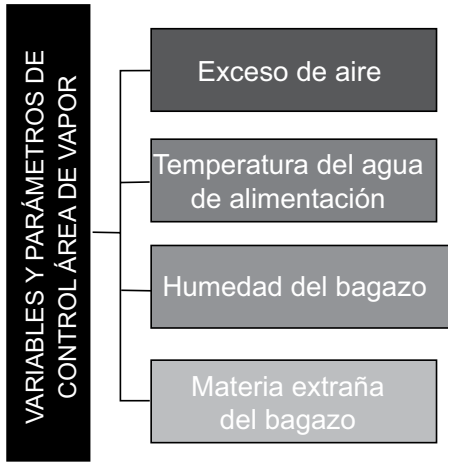


Ilustración 14. Variables operativas y parámetros que se verifican tanto del equipo como del combustible

Área de cristalización[2]

El área de cristalización hace uso de evaporadores de simple efecto al vacío, conocidos como tachos, los cuales a través de la evaporación permiten la circulación de la masa en el tacho y favorecen la cristalización. Durante la misma se alimenta en los tachos la masa (compuesta por sacarosa y licor madre) proveniente del área de evaporadores y semilla. Mediante calentamiento la sacarosa de la masa se separa del licor madre a partir de su difusión en los cristales presentes en la semilla, para posibilitar su crecimiento.

Los tachos, vistos como los equipos en los cuales se lleva a cabo el proceso de cristalización, presentan las entradas y salidas que se muestran en la Ilustración 15.

[2] La información se recolectó con la dirección de Cenicaña, que en convenio específico con la Universidad Nacional de Colombia sede Palmira participó en la asesoría del proyecto Perea y Rodríguez, 2013.

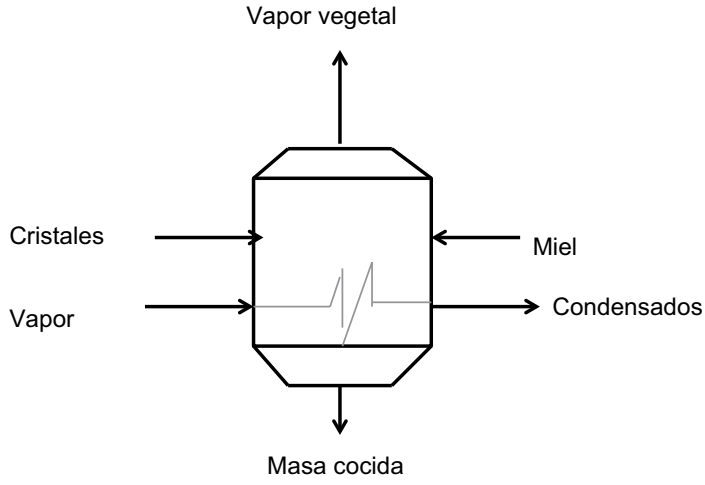


Ilustración 15. Entradas y salidas de materiales en los tachos

La producción del área de cristalización de un ingenio sin destilería generalmente comprende tres etapas, las cuales originan un tipo de masa cada una (A, B y C). Para la producción de cada tipo de masa se requiere de un tacho donde ocurre la cristalización y una centrífuga para separar la miel de los cristales. Los tachos de masa C son alimentados con cristal desarrollado y miel de B, los de B por cristal de C y miel de A, mientras que el tacho de masa A es alimentado por la semilla de B y meladura, el magma producido en los tachos de A en centrífugas se separa del licor madre y del grano de azúcar (Ilustración 16).

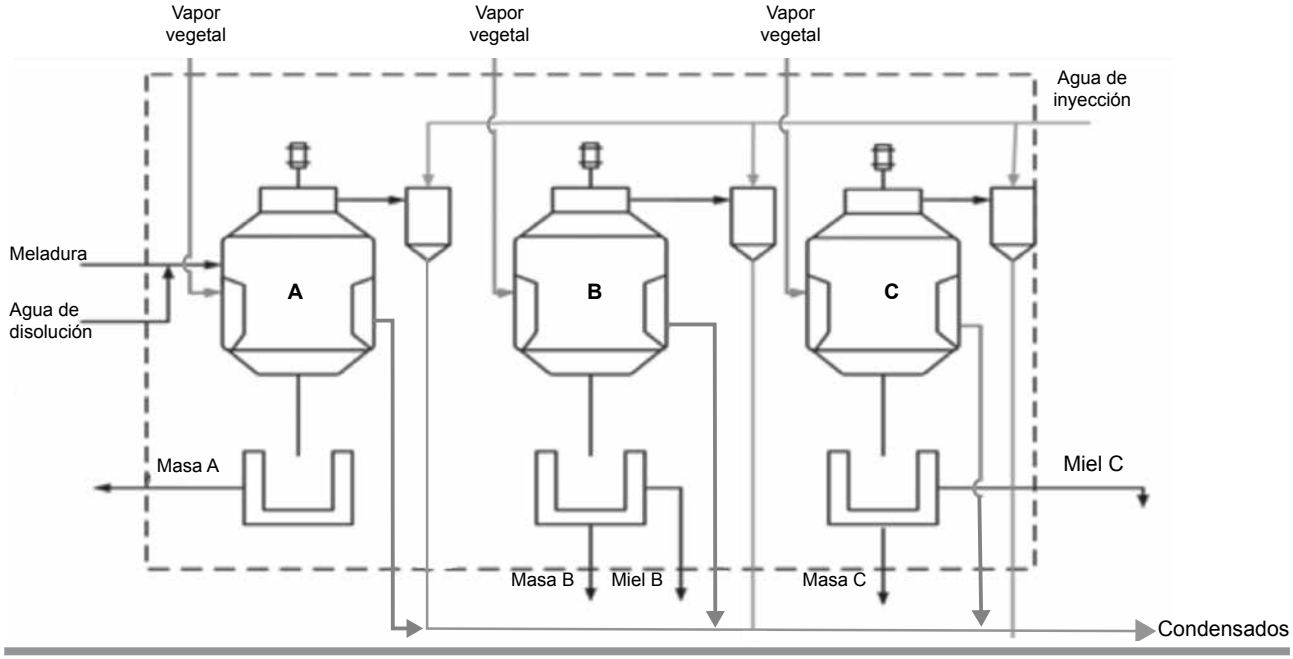


Ilustración 16. Proceso energético de la estación de cocimiento de los ingenios

De la información recolectada de los tachos y del área de cristalización se concluyó que los consumos de vapor y de masa cocida no son medidos, sin embargo, se encontró que se miden variables que permiten inferir estos valores a través de balances de masa y energía. De acuerdo con esto, y puesto que es un área en la que se lleva un proceso discontinuo y que no cuenta con IDE para su monitoreo, se propusieron IDE lineales y referidos en la literatura. Para ello, se tomaron:

$$I_1(t/t) = \frac{Toneladas\ de\ vapor}{Toneladas\ de\ agua\ evaporada} \qquad I_2 = \frac{Toneladas\ de\ vapor}{100\ t\ sólidos\ solubes} \qquad I_3(kg/m^2h) = Tasa\ de\ evaporación$$

Entre las variables y prácticas operativas aplicadas durante la cristalización y que influyen en la calidad de productos a obtener en los tachos, se encuentran:

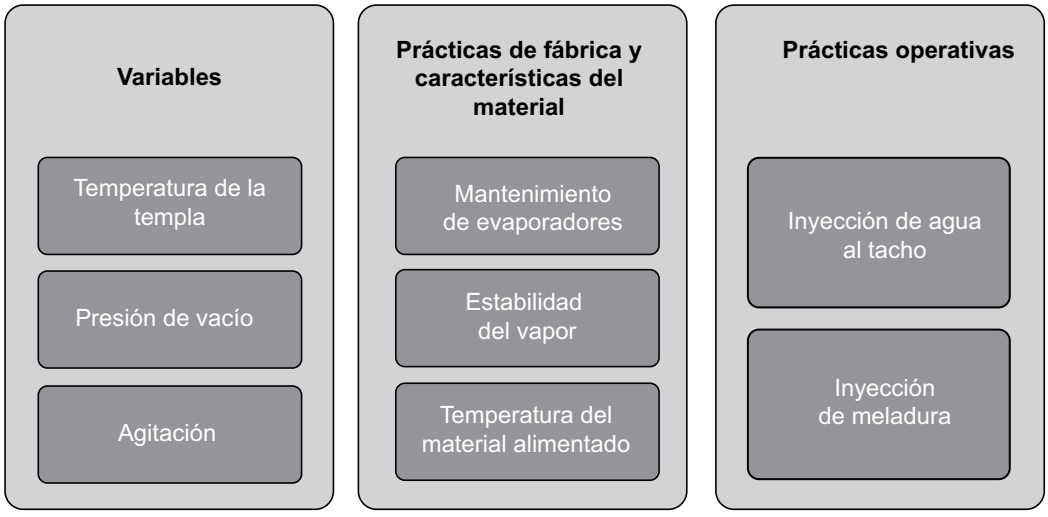


Ilustración 17. Variables y prácticas a verificar en el área de cristalización

4. Construcción de IDE y resultados obtenidos

Área de generación de vapor

Aplicando el método matemático para identificar la función que relaciona el consumo de bagazo con la generación de vapor, se encuentra que el bagazo necesario para accionar la caldera (calentamiento de la caldera y preparación) es de 304,5 mil libras, y adicional por libra de vapor se requiere 0,39 libras de bagazo (Ilustración 18).

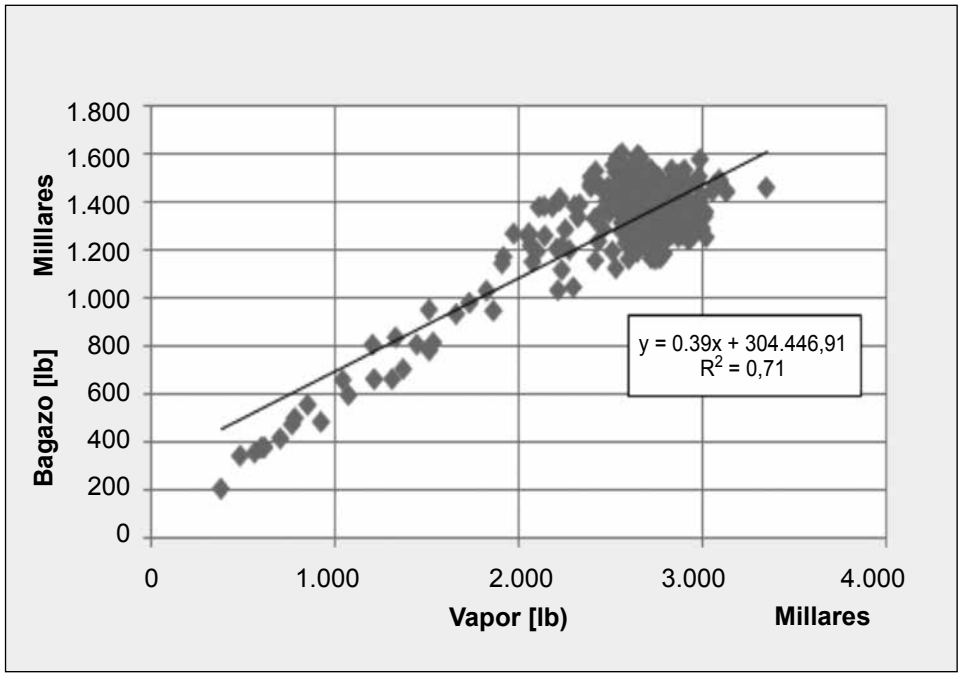


Ilustración 18. Línea base de consumo de bagazo, en función de la producción de vapor de la caldera A

Obtenida la ecuación se construyó la curva del IDE y se interpuso sobre los índices de consumo obtenidos en los períodos de tiempo, como se muestra en la Ilustración 19. Se identificó que la producción crítica (Pc) de vapor corresponde a una producción de 2.000.000 lb/día de vapor, para lo cual se logra operar con un indicador de desempeño energético de 0,55 lb bagazo/lb vapor. Se calculó que la caldera A del ingenio en términos de producción presenta un alto nivel de eficiencia, puesto que el 91% de los días la caldera operó con una producción igual o superior a la Pc, pero en términos de gestión asociados a las prácticas de operación y calidad del bagazo, la caldera operó con un 53% de eficiencia, es decir, existen oportunidades de mejora asociadas a las técnicas de operación y control de la caldera y condiciones de la composición y características del bagazo.

Adicionalmente, se identificó que el ingenio reporta como indicador de desempeño un valor de 0,5 lb bagazo/lb vapor. Dado que el ingenio opera por lo general con producciones superiores a la Pc, se puede continuar tomando como indicador de desempeño uno lineal e independiente de la producción, pero debe ser ajustado ya que este valor está subestimado en un 10% (Ilustración 19).

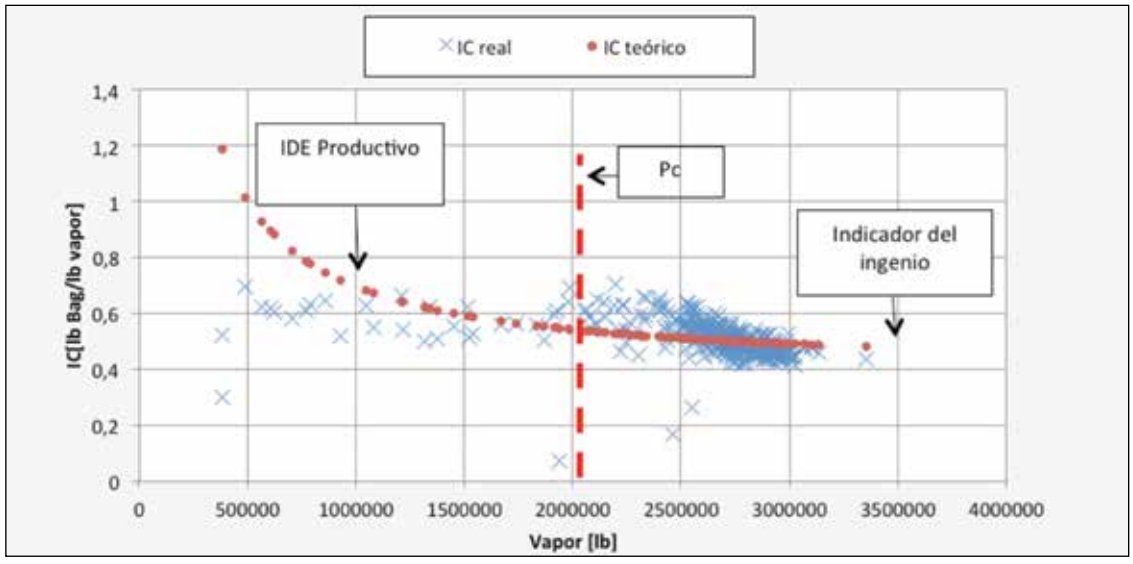


Ilustración 19. Indicador de desempeño energético en función de la producción de vapor de la caldera A

Evaluando el impacto de las variables consignadas en la Tabla 3, sobre el desempeño energético de la caldera, se construyó la gráfica de CUSUM, como se muestra en la Ilustración 20.

Tabla 3. Eficiencias asociadas a la producción y gestión de la caldera del ingenio piloto

Característica de la eficiencia	Número de días	Porcentaje
Total datos	352	100%
≥Pc	321	91%
E. Gestión	188	53%

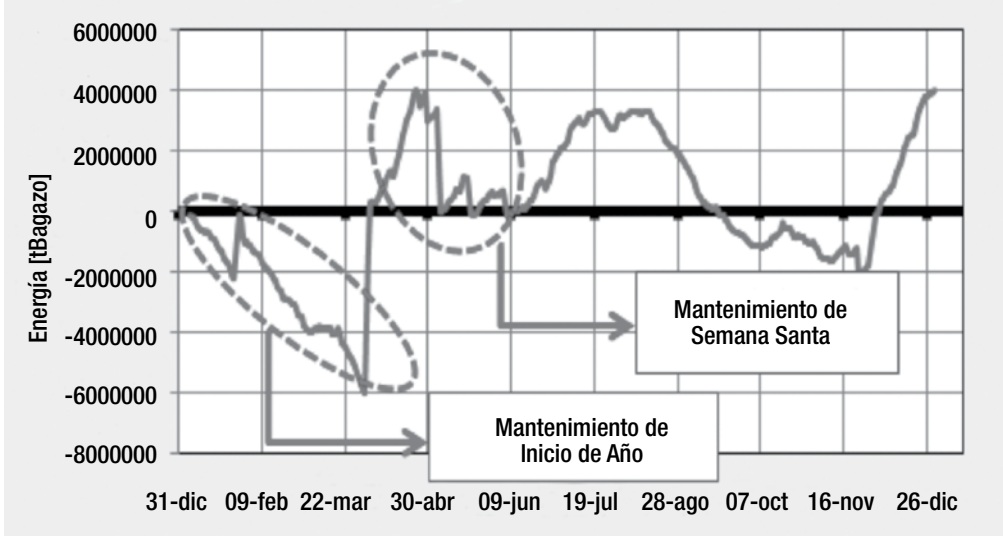


Ilustración 20. Tendencia del índice CUSUM y eventos relacionados con el mantenimiento de la caldera A

De la gráfica se concluye que:

- Después de los períodos de mantenimiento correspondiente a los meses de diciembre-enero y abril, la tendencia del índice de desempeño era hacia el ahorro, por un período de dos meses en ambos casos, pero transcurridos estos meses se evidencia nuevamente la necesidad del mantenimiento.

- En abril, la tendencia en el consumo aunque es eficiente es consecuencia de que previo a este tiempo existieron acciones de ineficiencia superiores a la línea base, lo cual al realizar el mantenimiento logró mejorar con respecto al período anterior, pero continuaba siendo ineficiente con respecto al máximo consumo de tendencia definido por la función de la línea base.

Se evaluó el impacto de la humedad a partir del Indicador Base 100 (IB100), propuesto por Campos, J. C. (2008), definido a partir de:

$$IB100 = \frac{\textit{Consumo de energía teórico}}{\textit{Consumo de energía real}} \qquad (7)$$

donde valores superiores a 100 indican ser períodos eficientes, mientras que menores, ineficientes e iguales, igual al de tendencia. Para valores obtenidos iguales o superiores a 100 se les asignó un valor de uno (1), mientras que a los inferiores, un valor de menos uno (-1). En la Ilustración 21 se muestra esta tendencia de eficiencia e ineficiencia en relación con la humedad.

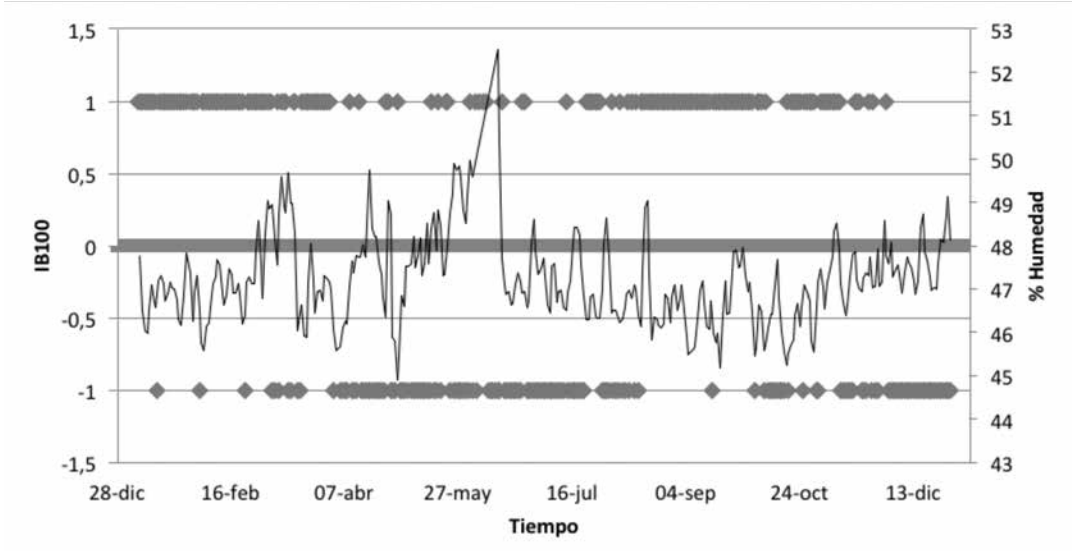


Ilustración 21. Indicador Base 100 vs. % humedad

La humedad del bagazo que alimenta la caldera A oscila entre 45% y 50%, sin embargo, se identificó que después de 48% de humedad la eficiencia de la caldera comienza a verse afectada.

Área de cristalización

Para la caracterización energética del área de cristalización se tomó otro ingenio piloto también ubicado en el valle geográfico del río Cauca, pero independiente al utilizado para el área de generación de vapor.

La producción del área de cristalización es por lotes y con carga constante. Como características se tiene que es poco común que se tome medición o registro de los consumos de vapor, por ello los IDE se tomaron de la literatura (Tabla 4) a:

Tabla 4. IDE del área de cristalización reportada por Rein, P. 2007

Tipo de Masa	$I_1(t/t) = \frac{Vapor}{Toneladas\ de\ agua\ evaporada}$	$I_2 = \frac{Toneladas\ de\ vapor}{100t\ Sólidos\ Solubles}$	$I_3 = (kg/m^2h) =$ Tasa de evaporación	
			Inicio	Final
A	1,15	47,7	38	22
B	1,20	22,5	25	6,2
C	1,30	17,5	18	3,5

Datos obtenidos mediante seguimientos a los tachos en el ingenio piloto se muestran en la Ilustración 22. Los tachos de masa A del área de cristalización presentan las mayores demandas específicas de vapor por unidad de tiempo, dada la mayor tasa de evaporación asociada a la alta pureza de los materiales alimentados. Mientras que los mayores consumos de vapor por unidad másica de sólidos solubles presentes en la cristalización se encuentran asociados a los cocimientos de masa C, esto por la menor pureza de la masa, por lo cual el tiempo de residencia de la masa en cocimiento en el tacho es mayor con respecto a los cocimientos de masa A y B.

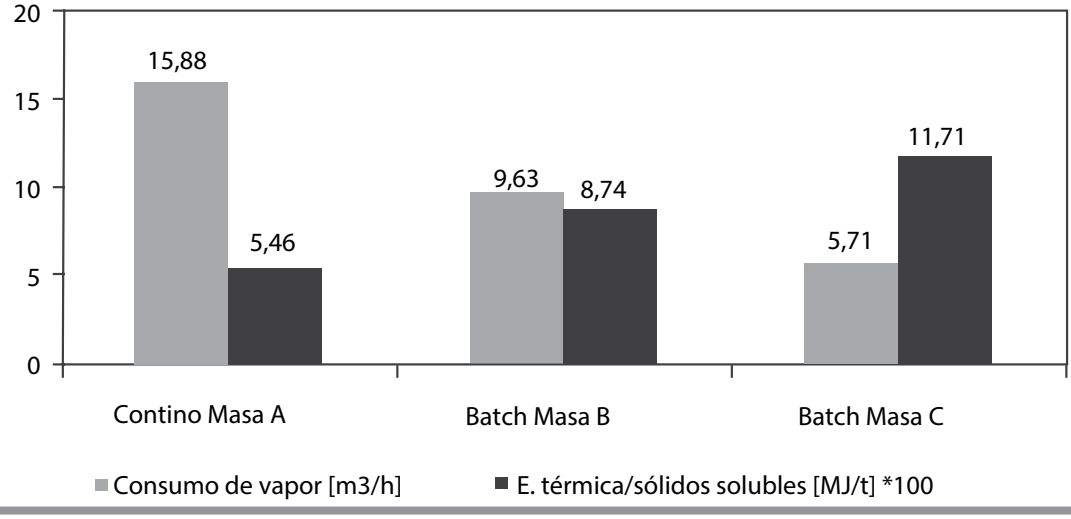


Ilustración 22. Consumos energéticos de los tachos de la estación

Frente a lo anterior se tomaron los tachos de masa A para el análisis de causas que impactan sobre la mayor demanda de vapor de los tachos durante su operación, una de las cuales es la siguiente:

Período de limpieza del tacho

En la Tabla 5 se observa que la operación de un tacho continuo sin limpieza disminuye la evaporación de agua, lo que conduce a disminuir la circulación de la masa en el cuerpo y esto a su vez a reducir la tasa de cristalización en el cuerpo, lo que afecta la homogeneidad del material.

Tabla 5. Características de los seguimientos con respecto al período de limpieza e impacto sobre los IDE

Número de seguimiento	Período sin limpieza	I_1 (Vapor/agua evaporada [t/t])	I_2 (t_t vapor/100t SS)	Agua evaporada [t/h]
			Ref. (47,7)	(1,15)
1	1 semana	1,20	21,60	13,36
2	1 semana	1,21	20,05	12,37
3	3-5 semanas	1,17	30,00	7,76

La limpieza de los tachos batch se realiza generalmente en forma rutinaria, por el vaciado de sus materiales cada cierta hora. Sin embargo, los tachos continuos operan durante largos períodos sin ser vaciados, por lo cual las incrustaciones de azúcar en su interior se convierten en una preocupación debido a dos factores (Rein, 1990):

- Acumulación del azúcar en la superficie del tacho. Esta incrustación se rompe en pedazos que al liquidarlos pueden bloquear los tubos o puntos de salida.
- Progresivas incrustaciones sobre las superficies de transferencia de calor reducen la tasa de transferencia de calor, lo que requiere que se incremente la presión en la calandria.

De acuerdo con los IDE reportados en la literatura, se identifica que el operar con tachos continuos es una oportunidad de ahorro energético, dado que permite menores requerimientos de vapor por unidad másica de sólidos solubles. Se calcula un ahorro de aproximadamente 27,7 t vapor/ 100 t SS, tomando como IDE 20 t vapor/ 100 t SS para un tacho continuo. De igual manera, se identificó que durante el seguimiento 3, en el cual se presentó el mayor período de operación sin limpieza del tacho, se redujo la cantidad de agua evaporada por unidad de tiempo en aproximadamente un 38,4%.

Aunque el período de limpieza es una práctica indebida de gestión que impacta sobre la demanda energética, ésta involucra períodos de inactividad por el vaciado del equipo y es decisión de los jefes de área, sin embargo, existen prácticas que dependen exclusivamente del operario del equipo y contribuyen a disminuir consumos energéticos y mejoramiento de la calidad del producto final, las cuales se detallan a continuación.

Pie de alimentación de semilla

Una óptima relación semilla/meladura alimentada (R. S/M) entre otras, garantiza un área superficial de los cristales acorde para permitir que las moléculas de sacarosa presentes en la meladura se depositen sobre estos y de ese modo producir un alto nivel de agotamiento. Rein (2007) sugiere un valor alrededor de 0,3 para esta R. S/M, equivalente a un pie de alimentación del 30%. Según Beesley (1954), una alimentación pobre en cristales produce granos de gran tamaño y pobres agotamientos, debido a la insuficiencia de área superficial de cristal. Mientras que una excesiva alimentación de cristales, aunque refleja un buen agotamiento, conduce a la formación de grano fino, el cual se perderá en centrífugas. Pero una alimentación de cristales adecuada no solo garantiza un buen agotamiento, sino también un buen tamaño del grano.

Durante los seguimientos 1 y 2, de masa A, se determinaron valores de R. S/M de 0,29 y 0,28, respectivamente. Sin embargo, para el seguimiento 3 la R. S/M fue de 0,84, superior al sugerido por la literatura (Ilustración 23). Esto como consecuencia de la no automatización de la válvula de alimentación de semilla, que al no estar asociada a un lazo de control permanece constante e independiente del nivel de meladura alimentado, ocasionando un mayor consumo de energía por cada SS, por la menor tasa de evaporación y, probablemente, el desarrollo de grano fino al suministrar menor cantidad de meladura (menos moléculas de sacarosa a difundirse sobre la superficie del cristal). Esta práctica genera sobreconsumos energéticos asociados al reprocesamiento de moléculas de sacarosa en cocimientos siguientes y a su vez limita la capacidad de centrífugas.

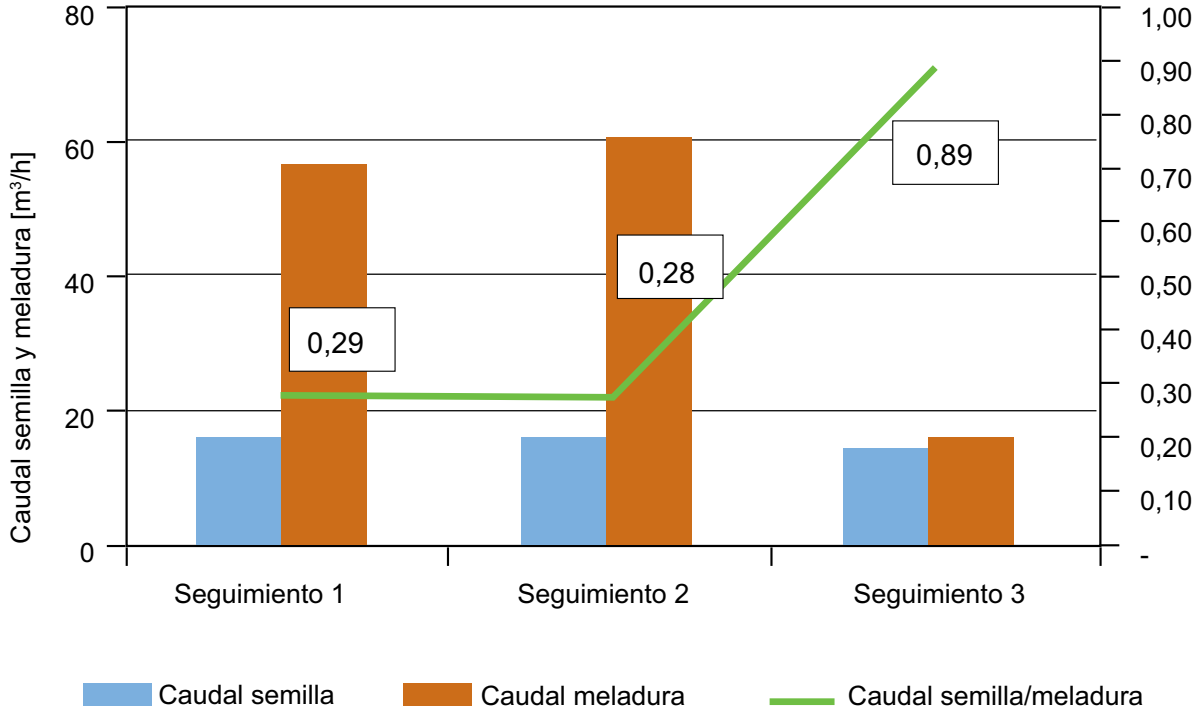


Ilustración 23. Flujos de semilla y meladura y su relación de alimentación

Control de la alimentación de la meladura/miel

El proceso de cristalización de la masa en los tachos ocurre por la concentración de sacarosa a través de la evaporación del agua, en el cual es necesario aumentar la concentración de sacarosa por encima de la de una solución saturada. Una solución saturada de sacarosa, en una solución en equilibrio termodinámico con una fase de sacarosa sólido, contiene aproximadamente dos partes de sacarosa por una de agua a temperatura ambiente, y casi cinco partes de sacarosa por una de agua a 100 °C.

El coeficiente de sobresaturación (SC) es la fracción en masa de sacarosa en agua dividida por la fracción en masa de sacarosa en agua en una solución saturada a una temperatura dada. Esto determina si una solución es insaturada (<1), saturada (=1) o sobresaturada (>1). Hay tres fases de sobresaturación:

- La zona metaestable, donde existen cristales que crecen en tamaño, pero no ocurre la nucleación de cristales. Esto corresponde aproximadamente a un coeficiente de sobresaturación entre 1 y 1,2.
- La zona intermedia donde existe constante crecimiento de cristales y ocurre la nucleación de cristales. El coeficiente de sobresaturación es aproximadamente 1,2-1,3.
- La zona lábil donde ocurre la nucleación espontánea sin la presencia de otros cristales. El coeficiente de sobresaturación es mayor de 1,3.

En los tachos para que ocurra la cristalización con éxito, la sobresaturación se debe dar en la zona metaestable y mantenerse constante, por lo cual el Brix permanece constante durante el crecimiento. Para ello, la cantidad de agua evaporada se repone por la meladura o miel alimentada. La tendencia típica de la evaporación durante los cocimientos es a disminuir a medida que transcurre el tiempo y aumenta el nivel y la viscosidad de la masa.

CAPÍTULO 5
Integración de indicadores ambientales al modelo de gestión integral de la energía. Caso de estudio: comportamiento del material particulado emitido en una caldera bagacera

Judith Rodríguez Salcedo
María Isabel Gutiérrez
Natalia Perea Velasco

El consumo de energía en los procesos está ligado, directa e indirectamente, a impactos ambientales como emisión de gases de efecto invernadero (Gei) y material particulado (MP) en la quema de combustibles. Esto significa que al evaluar un proceso en sus gastos de energía térmica, consecuentemente se evalúa el impacto ambiental

En este capítulo se muestra un nuevo panorama, para futuras investigaciones, en el campo ambiental. El caso de estudio sobre el comportamiento del material particulado emitido en una caldera bagacera, permite extender las fronteras del MGIE a la evaluación de indicadores ambientales como herramienta para estudios de impacto ambiental. En el proyecto caso se estudian *las variables que afectan la generación de material particulado en una caldera bagacera de un ingenio azucarero, a través de la aplicación de herramientas de gestión energética.*

El material particulado (MP) es el contaminante atmosférico más significativo en calderas bagaceras de los ingenios azucareros, y es de gran importancia debido a las implicaciones normativas que se deben cumplir para reducir el impacto ambiental generado; no obstante, esta variable puede establecerse como un indicador ambiental, ya que su generación

Recuerde que ...

Las calderas suplen las necesidades de vapor para la elaboración y alimentan los sistemas de generación de energía eléctrica (cogeneración). Por lo tanto, la intensificación de este proceso ha ido en aumento debido a la diversificación y crecimiento del sector, que actualmente tiene como productos principales: azúcar, mieles y etanol.

está asociada a la eficiencia energética del proceso, el cual está influenciado por: a) la calidad del bagazo (% humedad y % materia extraña-M.E.) y b) condiciones operacionales que implican un incremento del consumo de combustible con el fin de mantener la tasa de producción de vapor necesaria para el proceso fabril.

La deficiencia en el monitoreo de MP y el registro de datos son limitantes para establecerlo como un indicador del proceso. La cuantificación de MP se realiza por métodos de medición directa con altos costos y un alto nivel de complejidad logística, que impide una medición frecuente, y tiene una deficiente base de datos para el seguimiento

Con el objetivo de responder a esta necesidad, este estudio integró las actuales herramientas del MGIE con el indicador de emisiones de MP de la EPA para evidenciar que la humedad y el material extraño introducido en la caña a moler direccionan el comportamiento del consumo de bagazo en la caldera para la misma generación de vapor. La presencia de material extraño está relacionada con el comportamiento climático que se presenta en el valle geográfico del río Cauca, donde se concentra la industria azucarera colombiana.

Metodología utilizada para el desarrollo de la investigación

El estudio se efectuó a partir de los datos proporcionados por un ingenio azucarero del departamento del Valle del Cauca, acerca del proceso de generación de vapor de una de sus calderas bagaceras y la metodología que se utilizó (Ilustración 24).

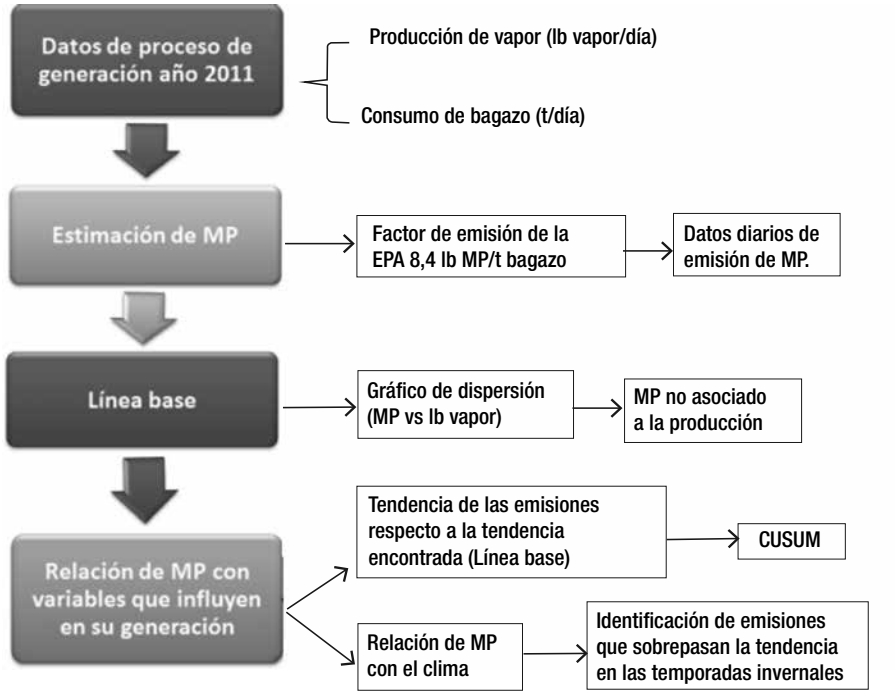


Ilustración 24. Metodología para el desarrollo del estudio

Normalmente las emisiones de MP a la atmósfera dependen de la eficiencia del equipo de tratamiento o control implementado en la caldera (ciclones, lavadores de gases, precipitadores electrostáticos, entre otros).

A continuación se muestra el procedimiento que se desarrolló para la integración de las herramientas del MGIE al indicador ambiental MP.

Paso 1

Se analiza la dependencia del MP y la producción de vapor realizando un gráfico de dispersión de estas dos variables para un período anual. Debido a la falta de datos de emisiones de MP se utilizó el método de factores de emisión (FE), para obtener un registro diario de emisiones asociándolo al consumo de bagazo de la caldera, con el indicador de emisiones de la EPA, 8,4lb MP/t bagazo aplicando la siguiente fórmula:

$$MP = A \times FE \times \left[1 - \left(\frac{ER}{100}\right)\right] \qquad (8)$$

Donde,
E: Estimado de emisión para la fuente
A: Nivel de actividad
FE: Factor de emisión
ER: Eficiencia del equipo de control

Al graficar las emisiones de MP (eje y) en función de la producción de vapor (eje x) se encontró una correlación significativa entre las variables, lo que significa una relación directa entre ellas y una dependencia del MP a la producción, lo que permite aceptar la ecuación de la línea tendencia de la dispersión de los datos, como la línea base de la generación de MP. Para validar los resultados encontrados se comparó el promedio diario de emisiones de MP estimado, con estudios que reportan emisiones de este contaminante en calderas bagaceras de igual capacidad.

Paso 2

Luego se evaluó el MP en función del contenido humedad y la materia extraña presente en el bagazo. Al realizar el gráfico de dispersión entre MP (eje y) y humedad (eje x) se encontró un nivel de correlación inaceptable, contrario a lo esperado. Un comportamiento similar se observó al analizar la relación con el contenido de ME, posiblemente debido a la alta variabilidad de estos parámetros que dependen de diversos factores como el clima, la eficiencia de los equipos de extracción y de los equipos de limpieza y lavado de bagazo que llega a los ingenios.

Como alternativa para establecer la dependencia de estas variables con el MP se utilizó el método de las sumas acumulativas (CUSUM), en el cual se muestra la tendencia de las emisiones de MP a lo largo del año, con respecto a la línea base encontrada, asociado a las temporadas de invierno establecidas por Cenicaña y al comportamiento de la humedad y materia extraña para ese mismo año. De esta manera se pudo identificar que existe una relación directa entre estas variables y las emisiones. Al aumentar el contenido de humedad y materia extraña en el bagazo, consecuentemente se incrementan las tasas de emisión de MP en las épocas de precipitación alta.

Paso 3

Usando el indicador base 100 (IB100) para determinar las emisiones de MP que están por encima de la tendencia encontrada en la línea base, y qué porcentaje de éstas pertenece a las temporadas invernales establecidas, se encontró que el indicador responde a las condiciones climáticas del medio, identificando las emisiones por encima de la tendencia en las épocas invernales establecidas y las influenciadas por el régimen de precipitación anormal del año 2011, debido a la intensidad del fenómeno de La Niña.

De esta manera, se concluye que el modelo respondió positivamente al análisis del indicador ambiental MP, y se presenta como una alternativa viable económica y logísticamente para el seguimiento y monitoreo de esta variable ambiental, tan sensible y regulada en los ingenios azucareros, que además representa impactos en el ambiente y en su proceso de elaboración.

Glosario

Áreas críticas energéticas: Son aquellas áreas que después de haber efectuado un diagnóstico energético se detectan mayores consumos, mayores fallas teniendo en cuenta el grado de importancia que represente el área en la organización o proceso.

Procesos productivos: Es la sucesión de diferentes fases o etapas que se requieren para obtener un producto o servicio. En el proceso podemos distinguir tres elementos o aspectos importantes: **1. Las entradas:** Las cuales hacen referencia a la materia prima, insumos, aditivos y energéticos**. 2. Productos intermedios:** Son aquellos que se originan como consecuencia de reacciones ya sean de óxido-reducción, etc., entre los diferentes compuestos presentes en las materias primas y los sistemas de transformación**. 3. Salidas:** Es el bien esperado o resultado de la transformación de los diferentes flujos de materiales**.**

Operación unitaria: Se define como el área de un proceso o un equipo en el cual se incorporan materiales, insumos o materias primas y ocurre una función determinada. También se puede definir como las actividades básicas que forman parte de un proceso.

Energéticos: Es toda sustancia sólida, líquida o gaseosa, de la cual podemos obtener energía mediante diversos procesos. Estos se clasifican en:

- ***Recursos energéticos orgánicos*** donde encontramos gas natural, petróleo, hidrocarburos sólidos, carbón.
- ***Recursos energéticos inorgánicos*****,** tales como uranio, radiación solar, vapor.

Portador energético: De acuerdo con la norma ISO 13600, un portador de energía es o bien una sustancia o un fenómeno que se puede utilizar para producir trabajo mecánico o calor o para operar los procesos químicos o físicos. Es cualquier sistema o sustancia que contiene para la conversión de la energía en forma de energía utilizable más tarde o en otro lugar. Así por ejemplo se encuentra la electricidad, el gas natural, el petróleo, el carbón, entre otros.

Energéticos primarios: Los energéticos primarios son aquellas sustancias clasificadas de esta manera químicamente, por su habilidad potencial para producir energía, que mayormente son utilizadas en el proceso.

Energéticos secundarios: Los energéticos secundarios son las sustancias clasificadas de esta manera químicamente, por su habilidad potencial para producir energía, que son mínimamente utilizados en el proceso.

Desempeño energético: Resultado medible, relacionado con la eficiencia energética, uso y consumo de la energía en un sistema.

Indicadores de desempeño energético: Valor cuantitativo o medida del desempeño energético de un proceso, equipo y organización.

Benchmarking: Proceso sistemático y continuo de comparación de los productos, servicios y procedimientos de trabajo de las empresas, que se reconocen con las mejores prácticas; su propósito es mejorar la organización, e implica el establecimiento de compromisos y sociedades.

Gases de Efecto Invernadero: Son gases componentes de la atmósfera terrestre y que provocan el efecto invernadero, el cual consiste en retener parte de la energía que la superficie planetaria emite por haber sido calentada por la radiación estelar.

URE: Es el Uso Racional y Eficiente de la Energía, es decir, aprovechar al máximo la energía sin perder la calidad de vida que nos brindan los servicios que recibimos de ella.

UPME: Es la Unidad de Planeación Minero Energética, unidad administrativa especial del orden nacional, de carácter técnico, adscrita al Ministerio de Minas y Energía, regida por la Ley 143 de 1994 y por el Decreto 255 de enero 28 de 2004. Se encarga de realizar la planeación del desarrollo sostenible de los sectores de Minas y Energía de Colombia, para la formulación de políticas de Estado y la toma de decisiones en beneficio del país, mediante el procesamiento y el análisis de la información.

Bibliografía

1. Agüero, A. C., Pisa, J. R., Agüero, C. J. y Torres A. (2011). Poder Calorífico del Bagazo de Caña de Azúcar. Disponible en: http://www.herrera.unt.edu.ar/revistacet/anteriores/nro24/pdf/n24ext02.pdf. Visitado el 11 enero 2013.

2. Banco Interamericano de Desarrollo, Cámara de Comercio de Bogotá y Programa OPEN. *Guía metodológica para el uso eficiente de la energía en el sector acero, hierro, materiales no ferrosos y galvanotecnia*

3. Borroto, A., Lapido, M., Monteagudo, J., Teyra, M., Pérez M., Castillo, J., Padrón A., Viego, F., González, F. (2005). La gestión energética: una alternativa eficaz para mejorar la competitividad empresarial. *Energética*. Núm. 33, pp. 65-69, Universidad Nacional de Colombia-Colombia.

4. Jaramillo, H. (1999). Gestión energética en la industria. *Estudios Gerenciales*. Núm. 73, p. 50-60, Universidad ICESI-Colombia.

5. Lionnet G. R. E (1998): Impurity transfer rate during the crystallization of sucrose. Proc. S. Afr. Sugar Technol. Ass. 72, 261-267.

6. Love, D.J. (2005) Achieving and controlling vacuum in process vessels using condensers and vacuum pumps.Proc. S. Afr. Sug. Technol. Ass., 79: 286–300.

7. Monteagudo, J., Gaitán, O. (2005). Herramientas para la gestión energética empresarial. *Scientia et Technica*, vol. XI. Núm. 29, p. 169-174, Universidad Tecnológica de Pereira-Colombia.

8. Perea, N. y Rodríguez, J. (2013). *Precaracterización energética de los ingenios azucareros como estrategia para el desarrollo de un programa de producción asociado al consumo de energía*. Proyecto Jóvenes Investigadores Colciencias 2012. Universidad Nacional de Colombia sede Palmira.

9. Pérez, C., Vera, F. (2011). Indicadores de gestión enfocados al ahorro energético para la industria de beneficio de feldespato. *Scientia et Technica*, vol. XVI, núm. 49, p. 72-77. Universidad Tecnológica de Pereira-Colombia.

10. Pérez C., Vera, F. (2012). *Fundamentos para la administración energética en la industria colombiana a través de indicadores de gestión*. Scientia et Technica. Año XVII, No 50, p.58-67. Universidad Tecnológica de Pereira.

11. Pérez, G. O., González, G. S. y Martínez, Y. (Agosto 2013). La gestión energética en el contexto empresarial cubano. *Revista Caribeña de Ciencias Sociales*. Disponible en http://caribeña.eumed.net/gestion-energetica-contexto-empresarial-cubano.

12. Rein, P. (2007). Cane Sugar engineering.

13. Universidad Nacional de Colombia, Universidad del Atlántico, Universidad Autónoma de Occidente, Universidad Pontificia Bolivariana y Universidad Industrial de Santander. Informe Proyecto PEN: SGIE entregado a Colciencias. *Programa estratégico para la innovación en la gestión empresarial mediante la asimilación, difusión y generación de nuevos conocimientos en gestión energética y nuevas tecnologías e implementación del Sistema de Gestión Integral de la Energía en empresas de cinco regiones del país*. Código: 1101-454-22024 - CONTRATO RC No. 700-2008.

Guía para la identificación de áreas, proceso y equipos críticos energéticamente e implementación de indicadores de desempeño energético

Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira, Facultad de Ingeniería y Administración
Grupo de Investigación en Eficiencia Energética y Energías Alternativas - GEAL
Impreso en el mes de abril de 2014 en Impresora Feriva S.A.
Calle 18 No. 3-33 - PBX: 524 9009
feriva@feriva.com
Cali, Valle del Cauca, Colombia, Suramérica
Tipografía texto: Myriad Pro
Tipo de papel: Propalcote C2S 115

Esta guía es el resultado de investigaciones realizadas por miembros activos del grupo de investigación G.E.A.L. mediante proyectos en gestión energética. A través de estos trabajos se recopiló y manejó información, para la caracterización de varias empresas de la región, y se elaboraron propuestas de gestión en las empresas en pro de ahorros de energía para mantener y/o aumentar la producción con los mismos consumos de energía. Con base en dichas experiencias, el grupo de investigación ve la necesidad de escribir un documento base que permita, en posteriores trabajos similares, ordenar metodológicamente las etapas de reconocimiento del desempeño energético en un proceso y la metodología para la selección de indicadores de desempeño energético y su posterior implementación.

Se espera que esta guía permita fomentar una cultura organizacional de ahorro energético, a través de la construcción de indicadores que lleve a las industrias a la sostenibilidad y optimización de sus recursos energéticos y procesos.

El objetivo principal de este documento es aportar las pautas, recomendaciones y referencias que permitan al personal encargado del área energética de las organizaciones aplicar criterios comunes y procedimientos coherentes para la identificación de áreas, equipos o procesos críticos energéticamente. De igual forma, se propone una metodología para la selección e implementación de indicadores de desempeño energético, que permitan controlar los consumos energéticos, tomando finalmente como caso de estudio el proceso de elaboración de azúcar de los ingenios.

ISBN: 978-958-761-948-5

9 789587 619485