

Estimación del potencial de ahorro de energía eléctrica en una Fábrica de Azúcar

Estimation of the potential for electrical energy savings in a sugar factory

Juan R Vidal-Medina¹  Enrique C Quispe-Oqueña²  Andrés F Rodríguez-Valencia¹ 

¹Universidad Autónoma de Occidente, Cali, Colombia

Resumen

El propósito de este estudio es presentar la aplicación de herramientas de gestión energética para llevar a cabo una caracterización energética de un Ingenio. Este trabajo de investigación se llevó a cabo en el marco de un proyecto industrial nacional, que recibió financiamiento de la Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial (ONUDI). El proyecto se dirigió específicamente a las pequeñas y medianas empresas (PYMES) del sector industrial del Valle del Cauca, con el objetivo de establecer herramientas de gestión para medir el desempeño energético y lograr mejoras sostenibles a lo largo del tiempo. Dentro del alcance de este estudio, pudimos identificar los usos significativos de energía, denominados variables significativas. Además, definimos la línea base de energía, la línea de meta y el índice de consumo. Además, se determinaron los indicadores críticos del valor de producción, el potencial de ahorro y el rendimiento. También se proporcionaron recomendaciones para mejorar el rendimiento energético de la empresa. En consecuencia, calculamos los potenciales de ahorro para los diferentes niveles de producción en el Ingenio, lo que se tradujo en un ahorro de energía de 1105537 kWh para el año 2021. Esto equivale a un costo económico de \$ 397993454.

Abstract

The purpose of this study is to present the application of energy management tools to carry out an energy characterization of a sugar mill. This research work was carried out within the framework of a national industrial project, which received funding from the United Nations Industrial Development Organization (UNIDO). The project was specifically aimed at small and medium-sized companies (SMEs) in the industrial sector of Valle del Cauca, with the objective of establishing management tools to measure energy performance and achieve sustainable improvements over time. Within the scope of this study, we were able to identify significant energy uses, called significant variables. Furthermore, we define the energy baseline, goal line, and consumption rate. In addition, critical indicators of production value, savings potential and performance were determined. Recommendations were also provided to improve the company's energy performance. Consequently, we calculated the savings potentials for the different levels of production at sugar mill, which translated into an energy saving of 1,105,537 kWh for the year 2021. This is equivalent to an economic cost of \$ 397,993,454.

Palabras clave: eficiencia energética, índice de desempeño energético, potenciales de ahorro energético, línea base de consumo de energía.

Keywords: energy efficiency, energy performance index, energy savings potentials, energy consumption baseline.

¿Cómo citar?

Vidal-Medina, J.R., Quispe-Oqueña, E.C., Rodríguez-Valencia, A.F. Estimation of the Potential for Electrical Energy Savings in a Sugar Factory. Ingeniería y Competitividad, 2024, 26(1) e-20613436.

<https://doi.org/10.25100/iyv.v26i1.13436>

Recibido: 12-07-23

Aceptado: 02-15-2024

Correspondencia:

jrvidal@uao.edu.co

Este trabajo está licenciado bajo una licencia internacional Creative Commons Reconocimiento-No Comercial-CompartirIgual4.0.



Conflicto de intereses:

Ninguno declarado



¿Por qué se llevó a cabo?

La Universidad Autónoma de Occidente, la Universidad Autónoma de Bucaramanga y la Universidad del Atlántico, fueron seleccionadas para liderar la implementación del Centro de Evaluación Industrial, CEI, en el marco del Programa de Evaluación Industrial, PEVI, y apoyar la mejora del desempeño energético del sector productivo nacional.

Para esta etapa, la UAO, a través del Centro de Evaluación Industrial UAO/PEVI, asesorará a un mínimo de 10 empresas del Valle del Cauca para mejorar su desempeño energético a través de la gestión energética. Una de las empresas seleccionadas fue Ingenio del Cauca (Incauca S.A.) donde se implementó la gestión energética como parte del programa PEVI.

¿Cuáles fueron los resultados más relevantes?

El estudio energético se aplicó a la obtención de azúcar y sus derivados en el Ingenio del Cauca S.A.

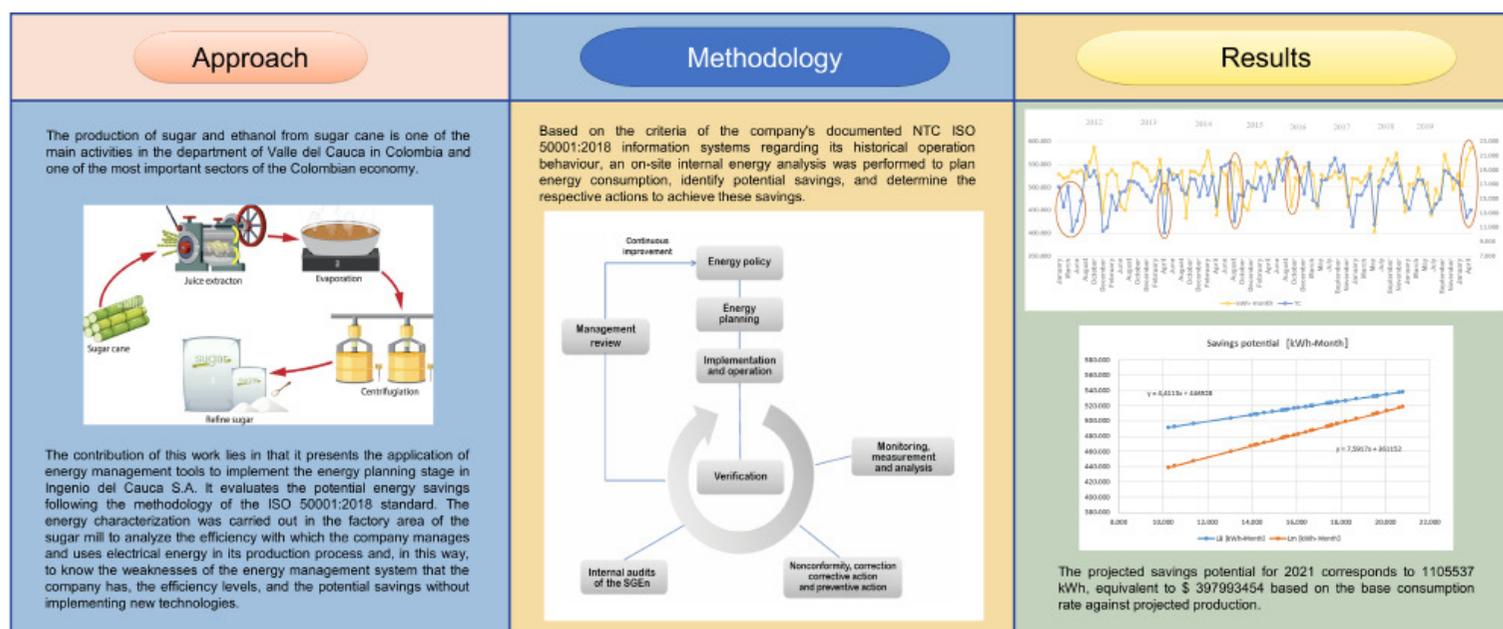
Se analizaron los datos de materia prima procesada y consumo de energía entre enero de 2012 y abril de 2020 para establecer opciones de mejora que se puedan aplicar para optimizar la operación de la planta. El análisis del valor P permite establecer que la variable significativa es las toneladas de caña y es la que tiene mayor impacto en el consumo de energía. De acuerdo a los resultados obtenidos, la variable a evaluar es la cantidad de caña procesada en unidades de toneladas. Al establecer líneas de referencia y objetivos para el consumo de energía en función de la cantidad de caña de azúcar procesada, el estudio calculó los ahorros potenciales de energía comparando el consumo real con el objetivo. Este análisis proporcionó información sobre oportunidades para optimizar el uso de energía en el proceso de producción de azúcar. Utilizando datos históricos, se promedió mes a mes la cantidad de materia prima procesada [toneladas] y el consumo de energía en kWh para el año 2021, y se determinaron los valores. A continuación, se identificó el IC base del mejor mes de producción, cuyo valor fue 25,9 kWh/TC, índice con el que se proyectó el nuevo consumo energético teórico para 2021 y se calculó el potencial de ahorro. El ahorro proyectado para 2021 es del orden de \$ 397'993.454.

¿Qué aportan estos resultados?

Los resultados del estudio sobre la estimación del ahorro potencial de energía en una fábrica de azúcar proporcionan varios conocimientos y beneficios valiosos:

1. Mejora de la eficiencia energética: al identificar usos energéticos significativos y analizar los patrones de consumo de energía, el estudio ofrece oportunidades para mejorar la eficiencia energética en los procesos de producción de azúcar. Esto puede conducir a ahorros de costos, reducción del consumo de energía y mayor sostenibilidad.
2. Optimización operativa: El análisis del consumo de energía en relación con la cantidad de materia prima procesada resalta áreas donde la optimización operativa puede conducir a ahorros de energía. Esta información puede guiar la toma de decisiones y la asignación de recursos para mejorar la eficiencia general.
3. Establecimiento de objetivos: Establecer líneas de referencia y objetivos para el consumo de energía en función de los niveles de producción permite establecer objetivos específicos para el ahorro de energía. Esto proporciona una hoja de ruta para implementar estrategias de gestión energética y monitorear el progreso hacia el logro de objetivos de eficiencia.

Graphical Abstract



Introducción

Actualmente la industria consume el 31% de toda la energía generada en el mundo, además, cerca del 67% de la electricidad se produce a partir de combustibles fósiles. Este panorama coloca, directa o indirectamente al sector industrial como uno de los más contaminantes del medio ambiente, pero a su vez, lo relaciona con altos potenciales de ahorro energético y de emisiones, ya que para un escenario de desarrollo sostenible al año 2050, la aplicación de la eficiencia energética puede reducir en 37% las emisiones de CO₂ (1) (2).

En los últimos años la eficiencia energética ha sido un tema de gran interés para las empresas debido a la necesidad de reducir costos de producción y aumentar su competitividad, así mismo, porque trae un impacto positivo para el medio ambiente al reducir las emisiones de CO₂ (3)- (6). El desempeño energético de los procesos industriales puede ser incrementado a través de medidas de cambio tecnológico y/o la implementación de un sistema de gestión energética. Así, el gran impacto de los sistemas de gestión energética en el incremento de la eficiencia y en la reducción de las emisiones de CO₂, llevó al desarrollo de la norma ISO 50001 con el apoyo de la ONUDI (7). La primera versión de la norma ISO 50001: Sistemas de gestión de la energía, se expidió el año 2011 y la segunda versión el año 2018 (8).

La estimación de la huella de carbono de la producción de azúcar sin refinar y refinada se ha identificado como un aspecto importante de la producción sostenible. Diferentes países y plantas han informado de diferentes huellas de carbono, y algunos han logrado menores emisiones mediante la venta de energía eléctrica y el uso de fuentes de combustible renovables. La necesidad de que las fábricas demuestren prácticas sustentables ha llevado a la presentación de informes de resultados de sostenibilidad basados en pautas propuestas por la *Global Reporting Initiative* y la acreditación según ISO 14001 para la gestión ambiental (17). También, se identifican las prácticas de sostenibilidad de las empresas del sector cañero brasileño que participan en el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) e investigan su asociación con el desempeño financiero. Los resultados indican que las prácticas de sostenibilidad más comúnmente realizadas en la industria están relacionadas con la reducción de la quema de caña y de las emisiones de CO₂, la preservación o restauración de áreas naturales y la generación de electricidad (18). La industria del etanol de caña de azúcar en Brasil ha demostrado un compromiso con la sostenibilidad mediante el uso de normas voluntarias, códigos de conducta y prácticas de responsabilidad social corporativa, particularmente en el estado de Minas Gerais, ha recibido importantes inversiones extranjeras para su expansión, lo que indica un gran interés internacional (19)(20).

Empresas de caña de azúcar y etanol en Brasil han buscado la certificación del Estándar de Sistema de Gestión para volverse más atractivas en los mercados internacionales y facilitar el proceso de exportación, particularmente a la Unión Europea y Asia. La estructura de preferencia por las certificaciones en la cadena de suministro de caña de azúcar brasileña muestra una mayor preferencia por proveedores con certificaciones ISO 9001, ISO 22000, ISO 14001, OHSAS 18001 e ISO 27001 (21). Gutierrez et al. (22) proponen una metodología para la evaluación energética de la estación de evaporación de un ingenio azucarero, complementando los métodos existentes para la gestión energética en los ingenios azucareros. También implica planificar los recursos y el tiempo necesarios, recopilar datos experimentales de operación, revisar y calibrar instrumentos de medición y aplicar las recomendaciones para la planificación de auditorías energéticas establecidas en la norma ISO 50002. Hernández et al. (23) proponen un esquema térmico optimizado para el ingenio, que incluye el reemplazo de generadores y la rehabilitación del aislamiento, lo que resultará en mejores indicadores de eficiencia como la cantidad de bagazo sobrante y la generación de electricidad.

Por otra parte, Mary et al. (24) en su estudio hallaron varias implicaciones para las empresas del sector agroindustrial, particularmente, aquellas involucradas en la producción y gestión de la energía de la caña de azúcar en Brasil. Da Silva Souza et al. (25) presentan en su estudio un índice para evaluar el desempeño ambiental del proceso industrial sucroenergético, teniendo en cuenta los residuos generados en las operaciones de fabricación. Este índice puede utilizarse como herramienta para orientar a las empresas hacia mejores prácticas ambientales y de gestión de residuos.

Es de destacar que la implementación de medidas de eficiencia energética es una práctica clave de bajo costo. Esto puede incluir acciones simples pero efectivas, como optimizar los procedimientos de arranque de equipos, realizar un mantenimiento proactivo para garantizar que los equipos funcionen con la máxima eficiencia e implementar arrancadores suaves para reducir las corrientes de arranque de la maquinaria (26).

Es importante tener en cuenta la cantidad y la calidad de la energía, para una mejor utilización de los recursos energéticos en los procesos de producción del azúcar. El análisis exergético puede ser muy pertinente para estimar las eficiencias de segunda ley en los diferentes componentes de una planta productora (9). También el sistema agrícola moderno requiere de una entrada de energía mayor en comparación con el sistema agrícola tradicional. La energía se utiliza directamente en las operaciones de labranza, siembra, cosecha; e indirectamente usados en insumos como plaguicidas, fertilizantes, transporte, construcción de drenajes y otros insumos que están asociados a la producción del azúcar (10). Esto hace que se tengan oportunidades de ahorro energético, y aunque los ingenios tienen una gran oportunidad de aportar al abastecimiento del mercado eléctrico colombiano, sus procesos no son eficientes debido al uso de tecnologías muy antiguas, por tanto, es importante estudiarlos para mejorarlos.

De acuerdo con Cenicaña 2015, en Colombia el gobierno ha venido incentivando el uso de cogeneración de energía a partir de biomasa mediante algunos decretos de ley que permiten exención a la renta a quienes vendan energía eléctrica proveniente de estas prácticas. Adicionalmente, se puede mencionar que el país tiene un gran potencial de desarrollar una industria cogeneradora con base en el bagazo de la caña de azúcar. En (11) se analizan diferentes opciones de sistemas de cogeneración en ingenios de caña de azúcar con el fin de evaluar las posibilidades de incrementar la generación eléctrica. Se tiene un caso sobre la industria azucarera y se elabora la economía para el sistema de energía de cogeneración avanzada, donde se tiene el reemplazo de las turbinas de los molinos de baja eficiencia con accionamientos hidráulicos y motores de corriente continua, la potencia de cogeneración aumenta en los ingenios azucareros para operar con alta eficiencia (65-70%). Este reemplazo ayuda a una mayor generación de energía, lo que conlleva a ingresos adicionales en la planta de azúcar (12). A la fecha, de las 21 plantas cogeneradoras existentes en Colombia, 11 corresponden a los ingenios azucareros: Risaralda, Riopaila, San Carlos, Providencia, Manuelita, La Cabaña, Castilla, María Luisa, Mayagüez, Incauca y Bioenergy. La Figura 1 muestra un informe anual de Asocaña donde se puede apreciar la capacidad instalada en cogeneración de los ingenios desde el año 2010 hasta el año 2018 y cómo se ha producido un incremento en ella desde 173,7 MW hasta 316,2 MW respectivamente.

Cogeneración y excedentes 2010 - 2018

Año	Capacidad instalada cogeneración (MW)	Capacidad instalada excedentes (MW)	Energía eléctrica cogenerada (MWh)	Venta de Excedentes al SIN (MWh)
2010	173,7	45,8	nd	nd
2011	180,0	52,9	nd	nd
2012	182,0	52,9	nd	nd
2013	186,5	50,5	1.091.090	349.244
2014	214,5	68,1	1.296.921	441.219
2015	236,5	78,1	1.380.948	513.843
2016	253,0	93,6	1.417.560	591.717
2017	306,2	119,6	1.555.960	622.218
2018	316,2	127,6	1.702.236	726.153

Figura 1. Informe anual ASOCAÑA 2018-2019

Los Sistemas de Gestión de Energía han demostrado su éxito como una metodología para mejorar el desempeño energético de las empresas, independientemente de su tamaño o actividad. Dado que los gastos asociados al uso de la energía representan una parte importante de los costos operativos de las empresas, resulta evidente que una reducción en los mismos contribuye de forma importante a su competitividad. El aporte de este trabajo radica en que presenta la aplicación de herramientas de gestión energética para implementar la etapa de Planificación Energética en el Ingenio del Cauca S.A y finalmente evaluar el potencial de ahorro energético siguiendo la metodología de la norma ISO 50001:2018. En este trabajo específicamente se realizó la caracterización energética en el área de fábrica del Ingenio con el fin de analizar la eficiencia con que la empresa administra y usa la energía eléctrica en su proceso productivo y de esta manera

conocer las debilidades del sistema de administración energética que posee la empresa, los niveles de eficiencia, y los potenciales de ahorro sin implementar nuevas tecnologías. Este Ingenio donde se implementó este procedimiento, participó en el Programa de Evaluación Industrial (PEVI), y está ubicado en el norte del departamento del Cauca, Colombia.

Metodología

Tomando como base los criterios de la NTC ISO 50001:2018 sistemas de información documentada de la compañía, en lo referente a el comportamiento histórico de su operación; fue realizado un análisis energético interno in situ, con la finalidad de planificar el consumo de energía, identificación de potenciales de ahorro y las respectivas acciones para lograr dichos ahorros (13)-(16). Esta Norma Internacional se basa en el ciclo de mejora continua Planificar – Hacer – Verificar – Actuar (PHVA) e incorpora la gestión de la energía a las prácticas habituales de la organización tal como se ilustra en la Figura 2.

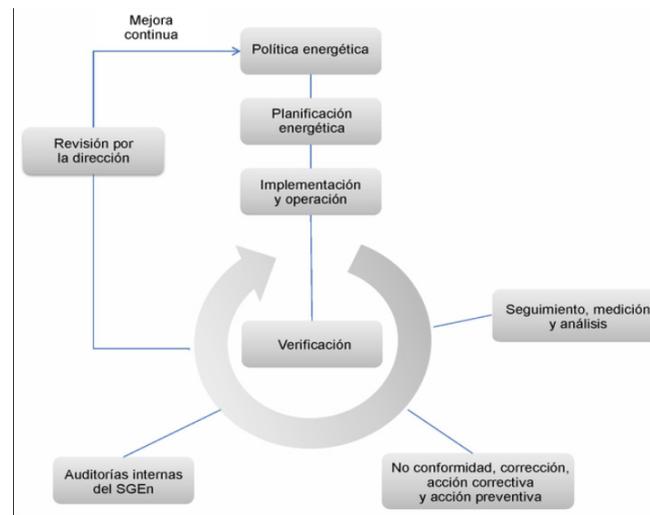


Figure 2. Ciclo de mejora continua

En el contexto de la gestión de la energía el enfoque PHVA puede resumirse de la siguiente manera:

- Planificar: llevar a cabo la revisión energética y establecer la línea de base, los indicadores de desempeño energético, los objetivos, las metas y los planes de acción necesarios para lograr los resultados que mejorarán el desempeño energético de acuerdo con la política energética de la organización. La figura 3 proporciona una vista esquemática de esta fase.
- Hacer: implementar los planes de acción de gestión de la energía.
- Verificar: realizar el seguimiento y la medición de los procesos y de las características clave de las operaciones que determinan el desempeño energético en relación con las políticas y objetivos energéticos e informar sobre los resultados.
- Actuar: tomar acciones para mejorar en forma continua el desempeño energético y el Sistema de Gestión de Energía.

Siendo la Planificación Energética la base para la implementación de un sistema de gestión de energía según la ISO 50001:2018, este trabajo sigue la metodología que se muestra en la Figura 3. Se debe aclarar que se abordará el componente táctico de la planeación energética.

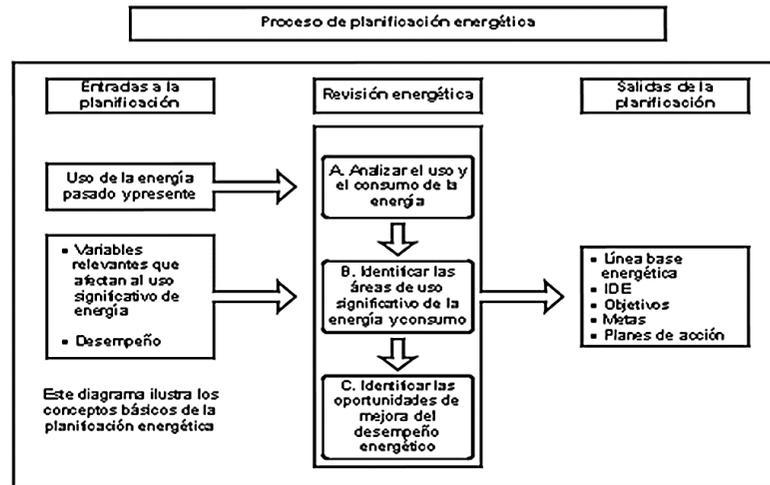


Figura 3. Planificación energética.

Resultados y discusión

El estudio energético fue aplicado al proceso de obtención de azúcar y sus derivados del Ingenio del Cauca S.A. Se analizaron los datos de materia prima procesada y consumo de energía de un periodo de tiempo entre enero de 2012 y abril de 2020 con el fin de establecer las opciones de mejora que puedan ser aplicadas para optimizar la operación de la planta.

En la Figura 4 se observa el comportamiento de la cantidad de materia prima procesada, para la cual se ha decidido utilizar como unidad las toneladas de caña **TC** en lugar de kilogramos **kg**, ya que es de uso común en los Ingenios Azucareros, y el consumo de energía mensual **kWh** en el periodo comprendido entre los años 2012 a 2020 para el proceso de obtención del azúcar y sus derivados.

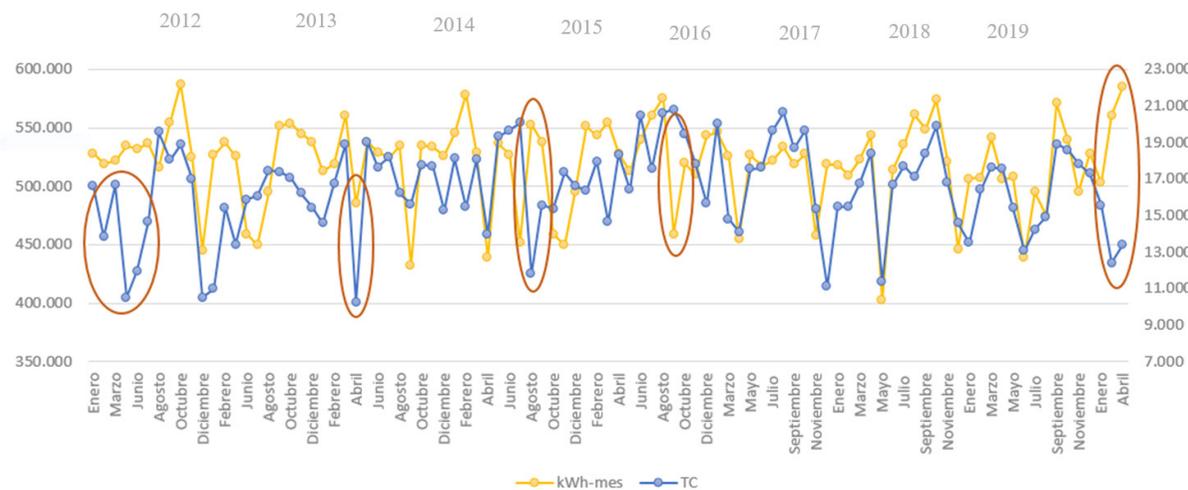


Figura 4. Análisis de consumo de energía

Se puede establecer que el comportamiento de ambos parámetros presenta una correlación predominantemente lineal, así que a medida que aumenta la cantidad de materia prima procesada, también lo hace el consumo energético. Sin embargo, se encontró que, para los meses de febrero, abril, mayo, junio, julio y diciembre de 2012, la energía consumida con relación a la materia prima procesada es muy superior a la media cuyos valores son 16455 toneladas de caña y 519114 kWh en consumo de energía, lo cual representa una oportunidad de mejora a través de un sistema de gestión de energía. Éste mismo comportamiento se presenta en diferentes meses de los años posteriores, creando así la necesidad de analizar las razones por las cuales la tendencia predominantemente lineal no se mantuvo y de esta forma proponer alternativas que mejoren la

correlación de los dos parámetros. En los óvalos en rojo se resaltan los meses para el cual se tuvo el mayor consumo energético con el mínimo procesamiento de caña, indicando una baja eficiencia en el proceso productivo y representando oportunidades de mejora.

En la Figura 5 se presenta el diagrama de Sankey para una parte del proceso de cogeneración del Ingenio del Cauca. A partir de los datos de consumo en los diferentes puntos de la fábrica se puede evidenciar que el proceso de molienda demanda el 30% de la potencia eléctrica generada (840kW) por cogeneración, así también el 45% (1260 kW) se destina a la subestación y el 17% (476 kW) a procesos en la fábrica. Se puede observar cómo en estos procesos se tiene oportunidad de mejora en el uso de la potencia eléctrica generada por cogeneración que corresponde a 2800 kW, lo cual indica que la parte de molienda se puede optimizar reduciendo pérdidas mecánicas, además se tendría que revisar las pérdidas energéticas en la subestación y procesos en fábrica.

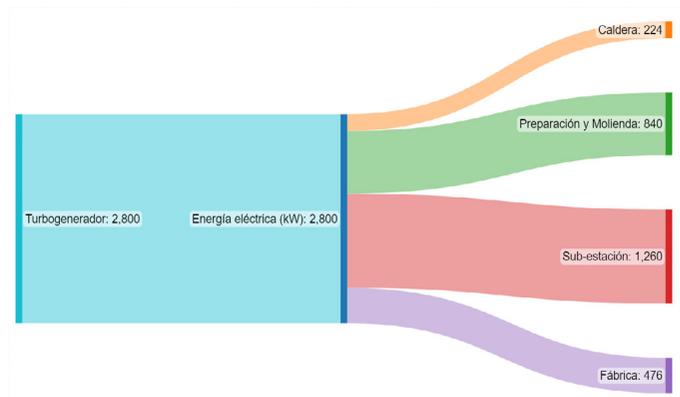


Figura 5. Diagrama de Sankey de los consumos energéticos

Para identificar los Usos Significativos de Energía en el proceso de obtención de azúcar y derivados de la caña se evaluaron tanto las variables energéticas como las condiciones operativas, cambios tecnológicos y la gestión de mantenimiento establecida por la empresa. Partiendo de la información suministrada por la empresa, se evidencia condiciones de operación dispersa lo que permite identificar que no se cuenta con procedimientos de operación y mantenimiento estandarizados lo cual representa una oportunidad de mejora.

Para el caso de estudio se evaluaron las siguientes variables:

- Cantidad de caña procesada
- Cantidad de fibra de caña
- Consumo de agua
- Flujo másico de vapor utilizado en el proceso

La tabla 1 presenta el análisis estadístico para las diferentes variables seleccionadas en el estudio, esto con la finalidad de poder determinar cuál es la variable que tiene mayor influencia en el consumo energético.

Tabla 1. Identificación de los usos significativos de energía

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad < 0,05	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Cantidad de caña procesada [Ton/h]	9,18904	3,40494	2,69874	0,00824	2,42938	15,94870	2,42938	15,94870
Consumo de agua [m ³]	1,01962	0,60542	1,68416	0,09543	-0,18229	2,22153	-0,18229	2,22153
Cantidad de fibra caña [ton]	-2760,53398	4243,80931	-0,65048	0,51695	-11185,56068	5664,49272	-11185,56068	5664,49272
Flujo másico de vapor [lb/h]	-0,00194	0,00305	-0,63538	0,52671	-0,00799	0,00412	-0,00799	0,00412

Este análisis *P-value* permite establecer que la variable significativa son las toneladas de caña y es la que tiene mayor impacto en el consumo de energía. De acuerdo a los resultados obtenidos, para este caso se estableció que la variable a evaluar es la cantidad de caña procesada en unidades de tonelada.

Se procedió a graficar la cantidad de caña procesada y el consumo energético. En la figura 6 se observa la línea de tendencia de la misma para la cual se obtiene la E_c (1):

$$E_m = 4,4113m + 446528 \quad R^2 = 0,0884 \quad (1)$$

El bajo factor de correlación está asociado con la alta dispersión del histórico de datos como se aprecia en la Figura 6. Normalmente el término independiente de la ecuación de la línea base representa la cantidad de energía consumida no asociada a la producción E_0 . Sin embargo, en el proceso productivo analizado, la etapa de molienda presenta un desfase de funcionamiento con respecto al resto de las etapas del procesamiento de la materia prima. En este caso ese consumo energético es 446528 kWh por cada mes.

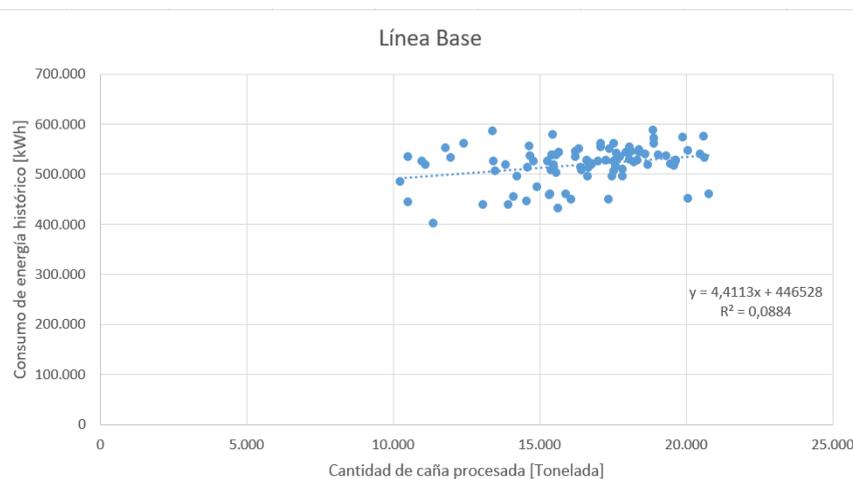


Figura 6. Gráfico de línea base del consumo de energía en función de la cantidad de caña procesada

Una vez establecida la línea base se evaluaron los meses en los que se presentó una óptima relación entre materia prima procesada y el consumo energético, con el fin de tomar como referencia dicho periodo para establecer la línea meta mostrada en la figura 7.

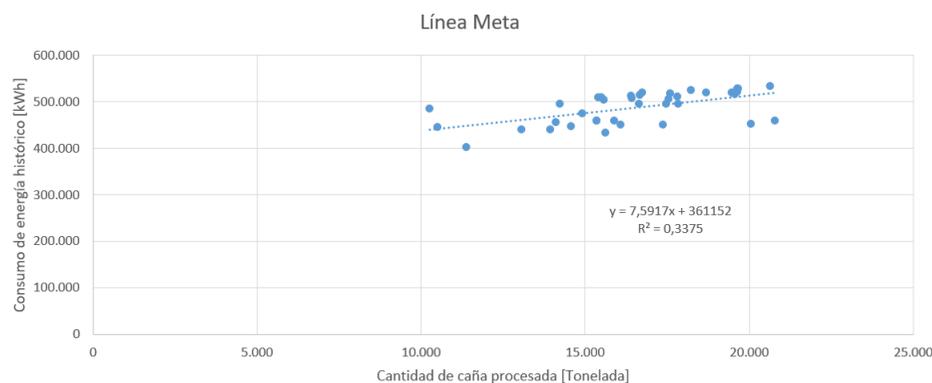


Figura 7. Gráfico de línea meta del consumo de energía en función de la cantidad de caña procesada

Es posible determinar los potenciales de ahorro energético restando, de la línea base energética, la línea meta, para ello se grafican las líneas base y meta establecidas previamente en un mismo gráfico como se observa en la figura 8.

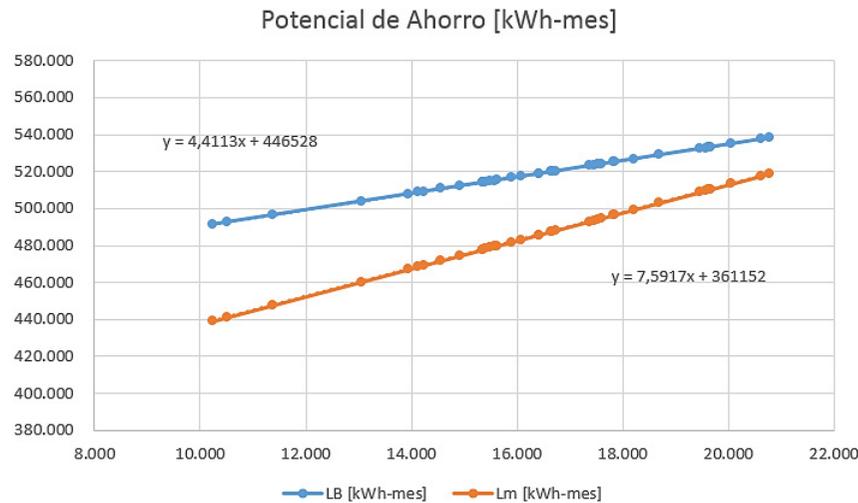


Figura 8. Gráfico de línea meta de kWh históricos en función de las TC históricas

De acuerdo a las toneladas de caña históricas desde el año 2012 hasta el año 2020 y las diferencias punto a punto de la línea base y la línea meta, se puede obtener los diferentes potenciales de ahorro. Un importante indicador instituido en este trabajo es el índice de consumo (IC), mediante el cual es posible establecer el potencial de ahorro energético por gestión de la producción. Este es obtenido a partir de dividir la línea base energética entre la producción P, matemáticamente se puede escribir como se muestra en Ec (2):

$$IC = m + \frac{E_0}{P} \quad (2)$$

El índice de consumo base se construye a partir de la ecuación lineal de la correlación de los datos de cantidad de caña procesada [toneladas] y el consumo de energía [kWh] representados por la Ec (1), de acuerdo con la información disponible, para cada mes desde el año 2012 hasta el año 2020. Este índice sirve de referencia en comparación con el índice de consumo real. Si el valor del índice de consumo real es menor que el valor del índice de consumo base, se operó de forma eficiente; en caso contrario la operación fue ineficiente.

De acuerdo con la información del estudio y lo observado en la figura 9, el índice de consumo muestra que, a mayor procesamiento de caña el índice de consumo de energía mejora sustancialmente.

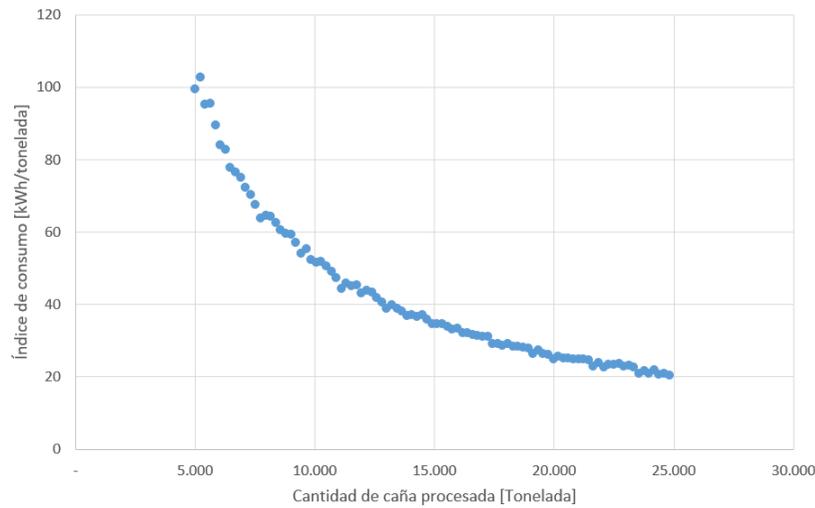


Figura 9. Índice de consumo en función de la cantidad de caña procesada

Evidentemente una planificación adecuada de la producción implica un mejor desempeño energético. El conocimiento de una producción crítica, donde el aumento de la producción no afecte significativamente el IC, es fundamental para tal planificación. Este valor es determinado con la suma acumulativa de la variación del índice de consumo teórico (ICt) respecto a la variación de la producción, siendo el ICt calculado con la ecuación de la línea base energética y los valores de producción reales. La producción crítica del Ingenio del Cauca es 16077 toneladas de caña, dicho valor fue hallado por medio del análisis estadístico. La Figura 10 muestra el punto de inflexión que identifica las toneladas de caña críticas a ser procesadas y divide las zonas de alto y bajo consumo de energía.

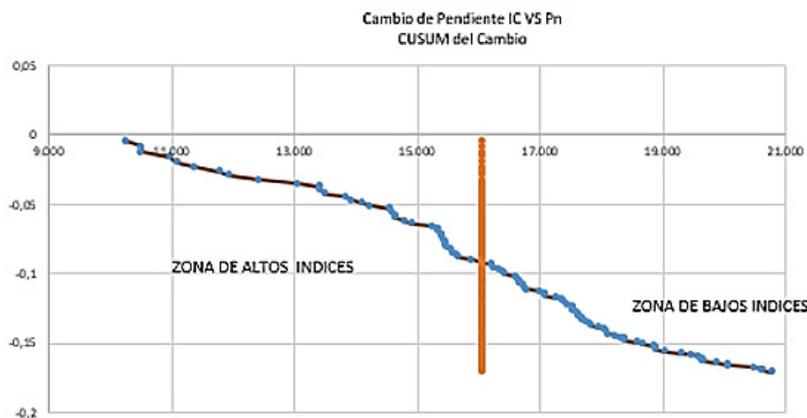


Figura 10. Identificación de la producción crítica del Ingenio del Cauca

El cálculo del potencial se basa en determinar el ahorro de energía que puede producirse por trabajar a más bajos índices de consumo de energía con la misma producción mensual. Esto se logra incrementando la tasa de procesamiento de caña por encima a la del punto de quiebre identificada. El índice de consumo para 16077 toneladas de caña fue de 28 kWh/TC muy cercano al valor del IC base (25,9 kWh/TC); mientras que el IC promedio fue de 32,28 kWh/TC. Este valor de producción crítica asociado a el tiempo de operación de 529 h/mes permite conocer la tasa de molienda promedio de 30,39 toneladas de caña hora (TCH), estos datos se pueden ver reflejados en la Figura 11. A partir de esta tasa de molienda el Ingenio del Cauca se estabiliza desde el punto vista operacional y energético.

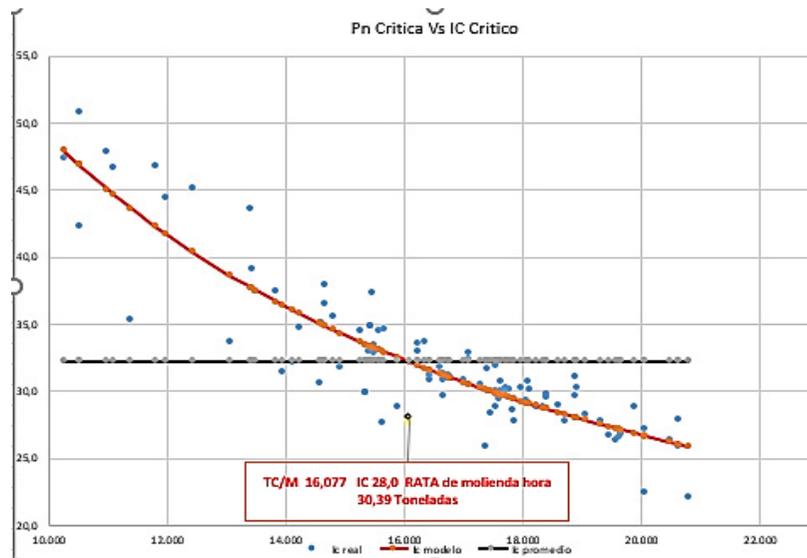


Figura 11. Índice de consumo crítico en función de la producción crítica

Utilizando los históricos de datos se promedió mes a mes y se determinaron los valores la cantidad de materia prima procesada [toneladas] y el consumo de energía kWh para el año 2021. Seguidamente se identificó el IC base del mejor mes de producción, cuyo valor fue de 25,9 kWh/TC, índice con el cual se proyectó el nuevo consumo teórico de energía para el año 2021 y se calcula el potencial de ahorro, valores mostrados en la Tabla 2. La proyección de ahorros para el año 2021 están del orden de los \$ 397'993.454.

Tabla 2. Potencial de ahorro estimado para el año 2021.

Mes	TC promedio histórico	Consumo promedio historico [kWh-mes]	Consumo Teórico [kWh-mes]	Consumo Meta [kWh-mes]	Potencial ahorro[(kWh-mes)]	Potencial ahorro [%]
Enero	15.144	523.904	392.233	476.122	131.671	25,13
Febrero	16.421	532.545	425.299	485.814	107.246	20,14
Marzo	16.228	539.717	420.303	484.350	119.414	22,13
Abril	14.431	511.253	373.765	470.708	137.489	26,89
Mayo	16.513	503.951	427.683	486.513	76.268	15,13
Junio	16.612	507.166	430.264	487.269	76.902	15,16
Julio	17.286	530.348	447.712	492.383	82.637	15,58
Agosto	17.925	521.681	464.269	497.236	57.413	11,01
Septiembre	18.333	537.019	474.819	500.329	62.199	11,58
Octubre	17.010	504.679	440.552	490.285	64.126	12,71
Noviembre	14.554	504.935	376.944	471.640	127.991	25,35
Diciembre	17.266	509.361	447.180	492.228	62.181	12,2
Total general	16.477	518.880	Pahorro (kWh-mes) para el 2021		1.105.537	
			S/KWh		360	
			Pahorro (\$) para el 2021		397.993.454	

A continuación, se presentan las oportunidades de ahorro que se pueden tener para el Ingenio del Cauca una vez que se han presentado todos los resultados obtenidos de las herramientas de gestión energética.

Gestión energética por operación: partiendo de conocer que los ingenios presentan un desfase de alrededor 8 horas en los arranques y paradas entre el proceso de molienda de caña y el resto de la planta (Cogeneración, fabricación y Servicios); es de vital importancia mantener estos valores de tiempo en estándares que sean validados para el Ingenio del Cauca, lo que en el comportamiento lineal haría parte del Consumo de energía no asociada a la molienda de caña y representan un potencial de ahorro importante. En dicha dirección se recomienda la estandarización de las paradas

y arranques de la planta. Los tiempos perdidos por operaciones no estandarizadas de la planta aportan el 5% del total.

Gestión energética por mantenimiento: por otra parte, se recomienda hacer seguimiento a la programación de mantenimiento de los equipos de producción, con el fin de garantizar el cumplimiento en los tiempos de mantenimiento de las máquinas, con el objetivo de disminuir los tiempos de paradas no programadas de la planta que aportan alrededor del 8% del tiempo perdido y generan consumos de energía.

Generales: el Consumo de energía no asociada a la molienda de caña, representa el 86% del total de energía consumida en el Ingenio. Se recomienda además de las estandarizaciones de operación y mantenimiento ya mencionadas, el levantamiento y seguimiento en los consumos de otros equipos tales como aires acondicionados, sistemas de iluminación, pozos de agua fuera de la planta.

Administrativa: es importante que todo el personal que realiza actividades dentro de las instalaciones del Ingenio tome conciencia del uso eficiente de la energía, con la implementación de buenas prácticas, tales como apagar la iluminación, equipos de cómputo y el aire acondicionado, siempre que abandonen el espacio al terminar la jornada de trabajo.

Conclusiones

El potencial de ahorro proyectado para el año 2021 corresponde a 1105537 kWh, equivalente a \$ 397993454 basados en el índice de consumo base contra la producción proyectada.

Los valores de ahorro proyectados pueden alcanzarse o lograrse a partir de que el Ingenio del Cauca S.A implemente el sistema de gestión energética con el objetivo de analizar de forma precisa, efectiva e identificar las causas de los periodos de tiempo en los cuales la operación es ineficiente.

Con la Implementación del Sistema de Gestión de Energía vendría la estandarización de las operaciones y el mantenimiento de la planta, además de la toma de conciencia en el uso eficiente de la energía por parte del personal.

La producción crítica hallada de 16077 toneladas de caña por cada mes (30,39 Ton/h) referencia el punto a partir del cual la operación de la planta mejora sus indicadores de desempeño en lo relacionado al consumo energético.

El Índice de Consumo promedio del Ingenio del Cauca se encuentra en 32 kWh/Tonelada de caña; sin embargo, la línea base muestra un índice de consumo de 25,9 kWh/Tonelada de caña como mejor desempeño logrado; entre estos dos valores se encuentra ubicado el IC de 28 kWh/Tonelada de caña correspondiente a la producción crítica. Establecer como meta inicial llegar en promedio al punto crítico sería el primer objetivo con el fin de alcanzar el punto de mejor desempeño.

Agradecimientos

Nos gustaría expresar nuestro más sincero agradecimiento a la Universidad Autónoma de Occidente (Colombia) por proporcionar el tiempo y el apoyo económico para esta investigación. Así también, al Ingeniero Orlando Chavarría por todo el apoyo técnico en este proceso.

Referencias

1. International Energy Agency (IEA), World Energy Outlook 2019, IEA Publications, Printed in France - November 2019. Available: www.iea.org

2. Gómez JR, Quispe EC, del Pilar Castrillón R, Viego PR. Identification of technoeconomic opportunities with the use of premium efficiency motors as alternative for developing countries. *Energies*. 2020;13(20).
3. Donolo PD, Chiacchiera E, Pezzani CM, Lifschitz AS, De Angelo C. Economic Barriers to the Application of Energy Efficient Motors in Industry. *IEEE Lat Am Trans*. 2020;18(10):1817–1825.
4. González, A. J., Castrillón, R., & Quispe, E. C. (2012, May). Energy efficiency improvement in the cement industry through energy management. In 2012 IEEE-IAS/PCA 54th Cement Industry Technical Conference (pp. 1-13). IEEE.
5. Castrillon, R. D. P., González, A. J., & Ciro Quispe, E. (2013). Mejoramiento de la eficiencia energética en la industria del cemento por proceso húmedo a través de la implementación del sistema de gestión integral de la energía. *Dyna*, 80(177), 115-123.
6. Valencia GE, Cardenas Y, Ramos ES, Morales A, Campos JC. Energy saving in industrial process based on the equivalent production method to calculate energy performance indicators. *Chem Eng Trans*. 2017;57(September):709–14.
7. Castrillon R, Quispe E, Gonzalez A, Urhan M, Fandiño D. Metodología para la implementación del Sistema de Gestión Integral de la Energía: Fundamentos y casos prácticos. Cali, Colombia: Programa Editorial Universidad Autónoma de Occidente; 2016.
8. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC), NTC-ISO 50001:2018, Sistemas de gestión de la energía. Requisitos con orientación para su uso, Editada por el ICONTEC, febrero 2019.
9. Shukla A, Kumar SY. A review on exergy, life cycle and thermo economic analysis of sugar industry. *Int J Mech Eng Technol*. 2017;8(10):108–119.
10. Mohammadi A, Tabatabaeefar A, Shahin S, Rafiee S, Keyhani A. Energy use and economical analysis of potato production in Iran a case study: Ardabil province. *Energy Convers Manag* [Internet]. 2008;49(12):3566–70. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2008.07.003>
11. Ensinas A V., Nebra SA, Lozano MA, Serra L. Analysis of cogeneration systems in sugar cane factories - Alternatives of steam and combined cycle power plants. *ECOS 2006 - Proc 19th Int Conf Effic Cost, Optim Simul Environ Impact Energy Syst*. 2006;1177–1184.
12. Premalatha M., Priya SS, Sivaramakrishnan V. Efficient cogeneration scheme for sugar industry. *J. Sci. Ind. Res. (India)*. 2008;239–242.
13. D. B. Rojas OP. "Herramientas Lean para apoyar la implementación de sistemas de gestión de la energía basados en ISO 50001." *Energética* [Internet]. 2014;44(Septiembre 27 de 2014.):60. Available from: www.revistas.unal.edu.co/energetica
14. Morvay Z., Gvozdenac D, Applied industrial energy and environmental management. Great Britain, John Wiley & Son, Ltd, 2008.
15. Avella JCC, CaiCedo oMar fredy príaS, enriQue Ciro QuiSpe oQueña, Juan riCardo vidal Medina, edgar daniel lora figueroa. El MGIE, un modelo de gestión energética para el sector productivo nacional. *El hombre y la máquina* [Internet]. 2008;(30):18–31. Available from: www.revistas.unal.edu.co/energetica

16. UNIDO, GEF, BEE, "Promoting Energy Efficiency and Renewable A GEF-UNIDO-BEE Project Best Operating Practices Jamnagar Brass Cluster," New Delhi, India, 2017.
17. Rein PW. Sustainable production of raw and refined cane sugar. *Zuckerindustrie*. 2011;136(11):13.
18. Ferreira AA, Chiareto J, Cunha De Mascena KM. Sustainability practices and performance in the sugar and ethanol industry. *Rev Gest Soc e Ambient*. 2019;13(1):57–75.
19. Benites-Lazaro LL, Giatti L, Giarolla A. Sustainability and governance of sugarcane ethanol companies in Brazil: Topic modeling analysis of CSR reporting. *J Clean Prod* [Internet]. 2018;197:583–91.
20. Viana KRO, Perez R. Survey of sugarcane industry in Minas Gerais, Brazil: Focus on sustainability. *Biomass and Bioenergy* [Internet]. 2013;58:149–57.
21. Oenning-Soares EJ, de Oliveira LAB, de Melo FJC, Xavier L de A, de Medeiros DD. Sugarcane companies' preferences for certified suppliers in the supply chain. *Brazilian J Oper Prod Manag*. 2020;17(4):1–14.
22. Gutiérrez-benítez O, Hernández-fundora HR, Castro-rodríguez DJ. Metodología para la evaluación energética de la estación de evaporación de ingenios azucareros. 2023;43(2):254–273.
23. Hernández-Touset JP, Espinosa-Pedraja R, Pérez-Pérez C, García Roque de Escobar AM, Alfredo García-González I. Gestión Energética En Una Central De Azúcar Crudo Con Uso Del Software Sta 4.1. 2020;47(1):77–89.
24. Mary FSM, Renato LS, Willerson LC-S, Roberta S. Business strategy and environmental practices: Evidence in the sugarcane energy sector in Brazil. *African J Bus Manag*. 2018;12(2):44–57.
25. Da Silva Souza EG, Rebelato MG. Assessment of the environmental performance of sugarcane companies based on waste disposed of on the soil. *J Environ Heal Sci Eng* [Internet]. 2023;(0123456789).
26. Batista OE, Flauzino RA, Chaim OC, Lima DRM. A brazilian experience in energy management: Low-cost actions as strategy to reduce electricity costs. *IFAC Proc Vol* [Internet]. 2013;6(PART 1):40–7.