Diagnóstico del desempeño en consumo de energía eléctrica en plantas de beneficio en Colombia*

Diagnostic of Electric Energy Consumption Performance in Colombian Palm Oil Mills

Citación: Barrera, J., Ramírez, N., Garcia-Nunez, J. A., & Guevara, F. (2016). Diagnóstico del desempeño en consumo de energía eléctrica en plantas de beneficio en Colombia. *Palmas, 37*(4), 17-31.

Palabras clave: consumo específico de energía, plantas de beneficio, electricidad, *benchmarking*.

Keywords: Specific energy consumption, palm oil mills, electricity, benchmarking.

Recibido: junio de 2016

Aprobado: julio de 2016

* Artículo de investigación e innovación científica y tecnológica.

Juan Camilo Barrera Hernández
Auxiliar de Investigación. Programa de Procesamiento, Cenipalma
jcbarrera@cenipalma.org

Nidia E. Ramírez Contreras
Asistente de Investigación. Programa de Procesamiento, Cenipalma

Jesús Alberto García Núñez
Coordinador Programa de Procesamiento, Cenipalma

Favián Enrique Guevara Trujillo
Auxiliar de Investigación. Programa de Procesamiento, Cenipalma
(Hasta 2014)

Resumen

Este artículo presenta los resultados obtenidos a partir de la implementación de la metodología de medición de consumo de energía eléctrica en plantas de beneficio. El análisis de la información se desarrolla bajo cuatro aspectos: la generación y/o el suministro, la demanda, el consumo y la calidad de la energía eléctrica. En este estudio participaron ocho plantas de beneficio ubicadas en las zonas palmeras Norte, Central y Oriental. Los análisis son presentados de acuerdo con el volumen de información disponible en cada planta durante el tiempo de ejecución de la investigación; por lo tanto, no todos los resultados son consolidados con el mismo número de plantas. El análisis de generación y suministro expone las proporciones de uso de energía eléctrica en tres plantas de beneficio, siendo el proceso de cogeneración el que suministra más del 60 % de la energía eléctrica consumida. En el análisis de demanda se realizó una comparación entre la capacidad nominal de las plantas de beneficio y la fuerza motriz instalada en seis plantas. Además, se evaluaron los requerimientos de la carga a través del indicador factor demanda, donde en promedio se utiliza 67 % de la potencia instalada. En cuanto al análisis de consumo, se calculó un indicador promedio de consumo de energía eléctrica de 22,06 kWh/t de RFF (racimos de fruta fresca) sin incluir la

extracción de aceite palmiste para seis plantas de beneficio. El análisis de consumo presenta un *benchmarking* de indicadores entre seis plantas de beneficio, para identificar la relación entre consumo de energía eléctrica y procesamiento de RFF. Adicionalmente, se hace un comparativo entre tecnologías de extracción de aceite de palmiste en función del consumo de energía, siendo la extracción por solventes la que refleja el menor consumo con 66.6 kWh/t de almendra. Finalmente, en el análisis de calidad de la energía eléctrica se discriminan los problemas más comunes que afectan el desempeño energético. Como resultado del diagnóstico de desempeño se describen las oportunidades de mejora en el consumo de energía eléctrica basada en los criterios operativos de las plantas de beneficio estudiadas.

Abstract

This paper presents the results of implementing a methodology for measuring electric energy consumption in palm oil mills (POMs). Information analysis is carried out considering four aspects: generation and/or supply, demand, consumption, and power quality. A total of eight POMs were surveyed in this work. Results are presented according to the volume of information available in each POM, therefore, these are specified for different number of mills. In the analysis of energy generation and supply, ratios of energy use by supply are exposed in three palm oil mills, being cogeneration the process that provides more than 60% of electric power consumption. A comparison between the nominal capacity of POMs and the driving force installed in six plants was conducted in demand analysis. Furthermore, the load requirement through the indicator demand factor, which is averagely used in 67% of the installed capacity was evaluated. As for the analysis of consumption, an average indicator of energy consumption of 22.06 kWh/t of FFB (fresh fruit bunches) was found. This indicator does not include oil kernel extraction. Through a benchmarking analysis with information from six POMs, the relationship between power consumption and RFF processing was identified. A comparison for palm kernel extraction technologies is also performed, being solvent extraction which reflects the lower consumption with a value of 66.6 kWh/t of kernel. Finally, in the analysis of power quality the most common problems affecting energy performance are identified. As a result of the diagnostic, energy performance improvement opportunities are described based on the operating criteria in the studied mills.

Glosario y siglas

EAPC: Extracción de aceite de palma crudo

RAPC: Recuperación de aceite de palma crudo

RAL: Recuperación de almendra

EAPL: Extracción de aceite de palmiste

PTA: Planta de tratamiento de agua

GVA: Generación de vapor

GEE: Generación o suministro de energía eléctrica

RFF: Racimos de fruta de fresca

ALM: Almendra de palma

Potencia: variación respecto del tiempo de entrega o absorción de la energía, medida en watts (W)

Potencia instantánea: potencia en cualquier instante de tiempo

Potencia nominal: potencia requerida por un equipo para operar

Introducción

La preocupación mundial por el cambio climático genera la necesidad de hacer un uso sostenible de los recursos naturales, sin embargo, esta preocupación puede ser vista como un objetivo estratégico a nivel de las industrias para aumentar su rentabilidad financiera. Lo anterior es posible si se implementan metodologías adecuadas para hacer un uso racional y eficiente de los recursos.

La agroindustria de la palma de aceite no es ajena a tal situación, por lo tanto, con el ánimo de incentivar una palmicultura sostenible se ha constituido la Mesa Redonda de Aceite de Palma Sostenible (RSPO, por sus siglas en inglés). Esta es una asociación sin ánimo de lucro que promueve la producción y el uso de aceite de palma con criterios de sostenibilidad ambiental, social y económica. La RSPO promueve un sistema de certificación que acredita a entidades asociadas con la cadena productiva del aceite de palma en sostenibilidad. A partir de 2015, contar con certificación RSPO se ha convertido en un requerimiento indispensable para la comercialización internacional de aceite de palma y palmiste. Dentro de los criterios de la normativa de la RSPO, el principio cinco exige la implementación de mejores prácticas operativas que garanticen la conservación de los recursos naturales y la biodiversidad a través de planes de uso racional y eficiente de los recursos.

En el sector industrial la energía eléctrica se ha convertido en el centro de atención, bien sea por su indispensable uso o por su relevante participación en los costos de producción. En ese sentido, obtener el mayor potencial aprovechable de la energía eléctrica en plantas de beneficio puede derivar en la disminución de los costos de producción asociados a la extracción de aceite de palma y palmiste. En otro escenario, para aquellas plantas de beneficio que comercializan o están interesadas en la venta de energía eléctrica, la reducción en su consumo de energía eléctrica les permitirá disponer de mayores excedentes para su comercialización. En este orden de ideas, para determinar oportunidades de mejora se requiere de un diagnóstico inicial de la manera en que se realiza el proceso de consumo de energía eléctrica en planta.

Con el objetivo de examinar el desempeño en el uso de la energía eléctrica en las plantas de beneficio de palma de aceite, Cenipalma, a través del programa de Procesamiento, desarrolló una metodología de medición de energía eléctrica en las diferentes secciones de la planta de beneficio. Por medio de esta metodología se llevó a cabo un diagnóstico del desempeño en consumo de energía eléctrica cuyos resultados permitieron consolidar una línea base para tener como referencia en el desarrollo de nuevos proyectos o en la posible reducción de los costos de producción. La línea base es una referencia cuantitativa que proporciona la base de comparación del desempeño en el consumo del recurso (ISO, 2011).

Metodología

El diagnóstico de consumo de energía eléctrica se desarrolló en ocho (8) plantas de beneficio distribuidas en las zonas Norte (3), Central (1) y Oriental (4). Estas plantas de beneficio tienen características diferentes en cuanto a su capacidad de procesamiento de fruto (t/h RFF) y almendra de palma (t/h ALM). La Tabla 1 presenta las características de las plantas de beneficio estudiadas.

Tabla 1. Características de plantas de beneficio estudiadas.

Caso de estudio	Capacidad nominal (tRFF/h)	Capacidad módulo extracción aceite de palmiste (tALM/h)	Caso de estudio	Capacidad nominal (tRFF/h)	Capacidad módulo extracción de aceite de palmiste (tALM/h)
Planta A	36	3	Planta F	42	N/A
Planta B	19	N/A	Planta G	45	7
Planta C	49	3	Planta H	25	3
Planta D	24	N/A	Planta I	30	3

La metodología empleada en el diagnóstico se fundamentó en el marco metodológico definido en la norma ISO 50001. Esta norma internacional es una guía metodológica para el establecimiento de sistemas de gestión y la definición de los procesos necesarios para mejorar el desempeño energético (ISO, 2011).

Adicional a la norma ISO 50001, el diagnóstico se rige de acuerdo con la estandarización modular, la cual permite representar el flujo de recursos, productos y dependencias. La estandarización modular hace parte del proyecto de Cenipalma denominado "*Modelo para la medición de Eficiencia Real de Producción y Administración Integrada de la Información en Planta de Beneficio*", que consiste en la unificación y consolidación de criterios de medición para cuantificar la eficiencia a nivel global de las plantas de beneficio, teniendo en cuenta las características de cada tipo de planta (Montero, Díaz, Guevara, Cepeda & Barrera, 2013).

El procedimiento aplicado para la obtención de la línea base de consumo de energía eléctrica se realizó con ayuda de equipos de medición eléctrica, tales como multímetros, pinzas amperimétricas (Fluke 375) y analizadores de redes fijos (PM 800) y móviles (Fluke 434 Series II). Los pasos llevados a cabo fueron:

1. Censo de carga: recopila información de la placa de los equipos involucrados en el consumo de energía, donde se registra información como potencia nominal (kW), corriente nominal (A), tensión de operación (V), factor de potencia, etc. Se complementa el censo reuniendo información de labores de mantenimiento y condiciones de operación.

2. Muestreo de potencia eléctrica y pruebas de carga: partiendo del censo de carga, se realizan mediciones de potencia instantánea (kW) mediante un analizador de redes, donde se cuantifica el factor de carga que presenta cada módulo productivo en la planta de beneficio.

3. Análisis de información histórica de consumo de energía eléctrica: identifica potenciales de ahorro y discrimina el consumo de energía no asociado a la producción. Se relaciona la información con datos de procesamiento de RFF, lodos de clarificación, producción de nueces y almendra. De esta forma se realiza un análisis de tendencias de producción y detección de mejores puntos operativos.

4. Medición de consumo de energía eléctrica: se realiza trazabilidad a la potencia eléctrica instantánea medida en conjunto con las horas de operación del proceso productivo, permitiendo así cuantificar el consumo de energía (kWh) por unidad procesada de cada uno de los módulos de producción estudiados.

5. *Benchmarking*[1]: se calculan indicadores de consumo específico de energía eléctrica para diferentes plantas de beneficio comparadas de acuerdo con su volumen de producción. Este análisis busca identificar tendencias que establezcan los mejores desempeños en consumo de energía eléctrica.

6. Identificación de oportunidades de ahorro: a través de tendencias de consumo se identifican los puntos de operación que registran el mejor desempeño energético. Con base en estos valores, se estima una oportunidad de mejora teniendo en cuenta únicamente las condiciones actuales de la planta (tecnología, condiciones de operación y estrategias de mantenimiento).

Resultados y discusión

A partir de la información recolectada en las plantas de beneficio, se realizó un análisis individual de cada uno de los módulos y áreas vinculadas al proceso de extracción de aceite de palma y palmiste. Adicionalmente, se desarrolló un *benchmarking* de indicadores con la intención de identificar acciones, condiciones y/o tecnologías que estén involucradas directamente con el desempeño energético.

Los resultados se presentan a través de cuatro puntos de estudio:

1 El *benchmarking* es un anglicismo adoptado para definir el proceso continuo para comparar el rendimiento y/o identificar, adaptar y adoptar prácticas que mejorarán el desempeño de un proceso; y, en general, el desempeño de una organización (Stapenhurst, 2009).

- Análisis de generación y/o suministro
- Análisis de demanda
- Análisis de consumo
- Análisis de calidad

A lo largo del documento se presentan los resultados para cada punto de estudio; en algunos análisis solo se presenta información parcial de algunas plantas de beneficio debido a limitaciones en la obtención de los datos correspondientes al estudio.

Análisis de generación y/o suministro

El objetivo del análisis de generación y/o suministro es determinar la proporción en que la energía eléctrica es utilizada en la planta de beneficio según su fuente de origen. Con la información se construyen diagramas circulares de distribución de energía eléctrica de acuerdo con su proveniencia (red externa, diésel, cogeneración y/o biogás). La Figura 1 contrasta diferentes tipos de distribuciones en tres plantas de beneficio. Los tres casos presentados están sujetos a la ubicación de la planta de beneficio y a particularidades propias de cada proceso. La planta A (Zona Oriental) se encuentra en una ubicación que no cuenta con una red de distribución con los criterios necesarios para atender la demanda de energía requerida por el proceso, por lo que toda la energía consumida por la planta de beneficio es generada a través de cogeneración con vapor (68 %) y generadores diésel (38 %) que soportan el arranque y parada de los equipos del proceso de beneficio de la fruta de palma de aceite.

El segundo caso presentado, muestra la distribución de energía eléctrica de la Planta B, ubicada en la Zona Norte. El 97,04 % de la energía eléctrica consumida es comprada a un comercializador de energía y el 2,96 % restante es generada en plantas diésel, las cuales entran en funcionamiento cuando se presentan intermitencias en el servicio de energía eléctrica comprada.

La Planta D, ubicada en la Zona Central, también compra energía eléctrica a un comercializador, sin embargo, su principal fuente de suministro es un proceso de cogeneración que suministra el 63 % de la energía eléctrica. En este caso, la energía eléctrica suministrada por la red (36 %) es utilizada en los procesos de arranque de los equipos y una vez estabilizado el sistema se realiza la transferencia de energía eléctrica al sistema de cogeneración. Adicionalmente, la planta cuenta con un generador diésel que es utilizado en caso de fallas en el suministro de energía por parte de las otras fuentes.

La Tabla 2 referencia los precios promedio de energía eléctrica en plantas de beneficio. De la distribución obtenida del análisis se calculan los precios ponderados para cada planta estudiada asumiendo costos similares para cada caso. La Tabla 3 presenta los precios ponderados para las plantas de beneficio estudiadas.

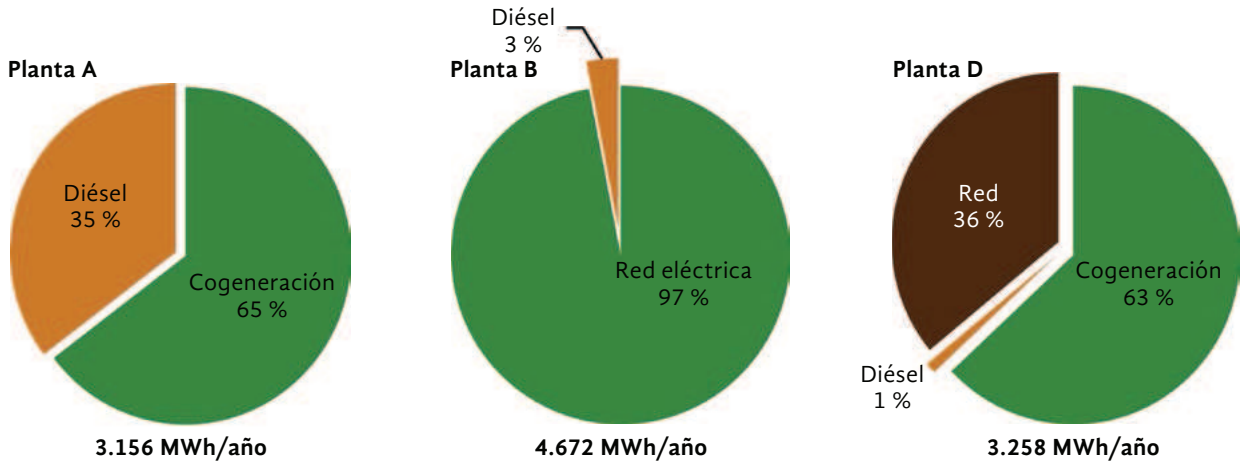


Figura 1. Distribución de energía eléctrica según fuente.

Tabla 2. Rangos en pesos colombianos de precios promedio de energía eléctrica durante el año 2015.

Generación y/o suministro	Red externa (usuario no regulado)	Cogeneración	Generación diésel
Precio ($/kWh)	350 - 450	120 - 180	650 - 750

Tabla 3. Precios ponderados de energía eléctrica en planta.

Precio ($/kWh)		Planta A		Planta B		Planta D	
Red	400	0 %	0	97 %	388	36 %	144
Diésel	700	32 %	224	3 %	21	1 %	7
Cogeneración	150	68 %	102	0 %	0	63 %	94,5
Precio ponderado ($/kWh)		326		409		246	

De acuerdo con los tres casos presentados, la ubicación específica de la planta de beneficio es un factor clave en la distribución del consumo de energía eléctrica, por lo tanto influye directamente en el costo de la energía. El costo promedio integrando fuentes económicas de energía puede llegar a ser entre 20 % y 30 % menor del precio pagado directamente a un comercializador.

Análisis de la demanda

En el análisis de la demanda se evalúa la utilización de la fuerza motriz instalada y la distribución de la potencia instantánea en los módulos de producción, a través de las mediciones de potencia instantánea y la información base de los motores (placas de motores).

Relación de fuerza motriz instalada

A partir de la información recolectada por medio de censos de carga en 6 plantas de beneficio, se determinó la relación que existe entre la fuerza motriz instalada y la capacidad nominal de cada uno de los módulos de producción vigentes en cada planta.

La relación de la fuerza motriz nominal instalada es un indicador que permite realizar comparaciones entre las plantas de beneficio, sin importar la capacidad instalada en cada una. A partir de la relación identificada se busca definir o estandarizar los requerimientos de fuerza motriz en el proceso industrial; la estandarización permite controlar la utilización de los equipos evitando lucros cesantes por el exceso de la fuerza motriz instalada. La Figura 2 describe la relación de potencia instalada por capacidad nominal de módulos de producción.

Con la información de la Figura 2 y las condiciones de operación de las plantas de beneficio estudiadas, se puede afirmar que las diferencias más marcadas están dadas por la presencia de equipos en *stand-by*, el uso de más de una línea de proceso (en la trituración de nueces y separación de almendra, por ejemplo) y el nivel de tecnología utilizado en las áreas productivas. Como muestra, en el módulo EAPL se destaca la diferencia de la Planta C (93,37 kW/t de nueces de palma (tNuez)) con la planta B y la planta F, como consecuencia del tipo de tecnología implementado en la obtención del aceite de palmiste. En este caso, se compara un proceso físico (extracción mecánica) contra un proceso químico (extracción por solventes).

En el módulo RAL, las diferencias en el indicador de potencia instalada entre las plantas estudiadas se deben a la cantidad de equipos instalados (transportador rompetorta, *rippler*, ciclones, etc.) como respaldo del proceso de recuperación de almendra. Por otro lado, el módulo RAPC mantiene la mayor cantidad de similitudes entre seis plantas estudiadas, dado que en seis de las plantas estudiadas se hace la recuperación de aceite de los lodos por medio de centrífugas deslo-

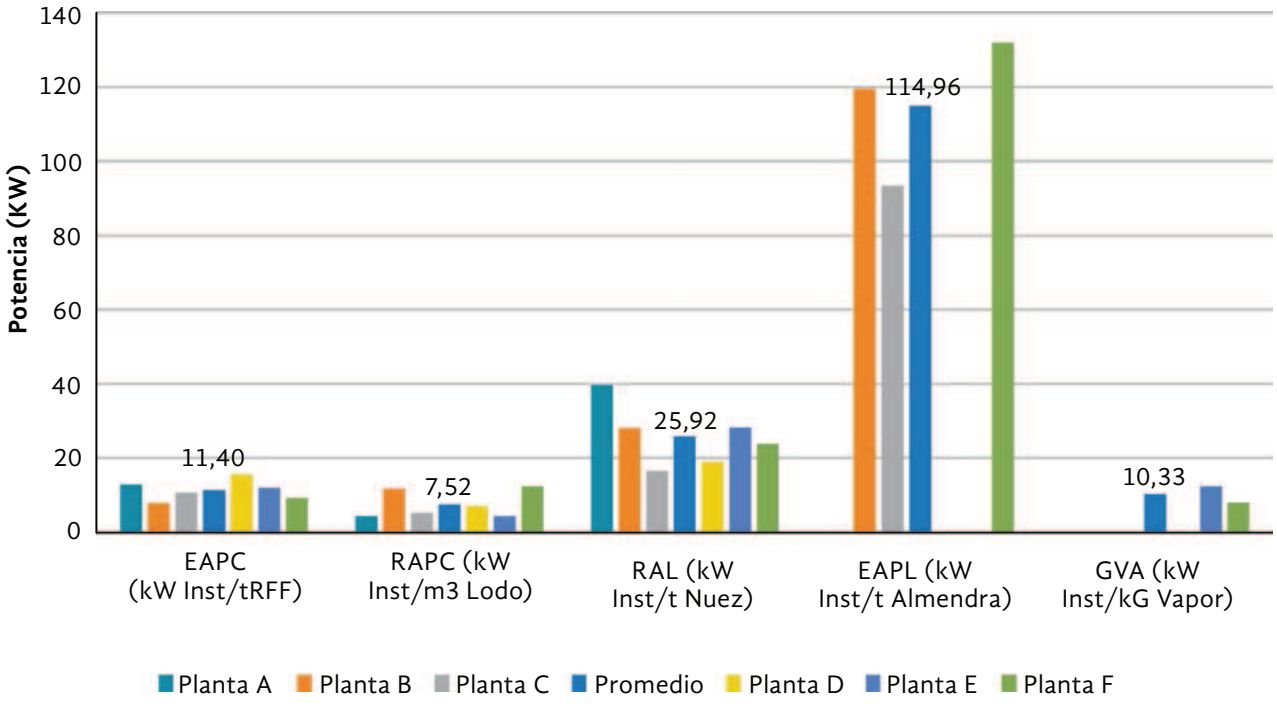


Figura 2. Indicador de potencia instalada por capacidad nominal en cada módulo de producción.

dadoras. Las variaciones que se presentan conciernen principalmente a las adecuaciones que se realizan a los equipos para aumentar su capacidad de procesamiento (adición de puntas de centrifugado).

Finalmente, las diferencias entre los índices en el módulo EAPC involucran la cantidad de equipos necesarios para garantizar la continuidad del proceso por medio de líneas de producción o equipos en *stand-by*. Otro factor que marca la diferencia es la implementación de tecnologías para la obtención del aceite crudo de palma, tales como la integración de sistemas de secado de aceite al vacío, sistemas de transporte (*redler*, elevador de cangilones, bazucas, sinfines) y/o otros tipos de tecnologías (*tridecanter*, prensa de raquis, picadoras, etc.), que pueden ser factores decisivos para incrementar o reducir la cantidad de fuerza motriz requerida, teniendo en cuenta la relación costo-beneficio del proceso productivo.

Factor demanda

Una forma de medir el desempeño del uso de la potencia utilizada es a través del factor demanda, el cual corresponde a la relación porcentual entre la demanda promedio (potencia instantánea) del sistema y la demanda máxima posible (potencia instalada). El factor demanda se calcula de la siguiente forma:

$$\text{Factor demanda} = \frac{\text{Potencia promedio (kW)}}{\text{Potencia nominal (kW)}} \times 100\ \%$$

Para hacer este análisis se debe tener en cuenta que los motores eléctricos son más eficientes con un 75 % de su carga (Turner & Doty, 2006), puesto que operar con valores cercanos al 90 % es un riesgo para la planta, debido a que un incremento en la operación del módulo puede llegar a sobrecargar los motores, afectando la vida útil del mismo. Por otra parte, trabajar con un factor demanda cercano al 50 % significa un exceso de fuerza motriz instalada en la planta de beneficio. Sin embargo, existen áreas de proceso que requieren equipos adicionales de respaldo, dada la criticidad del proceso que ejecutan. Se recomienda realizar seguimiento a estas condiciones con el fin de evitar la incidencia de sobredimensionamientos de fuerza motriz que ocasionan lucros cesantes a causa de equipos que permanecen en *stand-by* (respaldo ocasional).

En la Figura 3 se muestra un análisis para cuatro de las plantas estudiadas, estas cuentan con condiciones similares en cuanto a distribución de tiempo para operar y cantidad de fruta procesada. El factor de demanda calculado representa un nivel de carga eléctrica relativamente bueno, considerando que el factor demanda censado en las plantas de beneficio estudiadas se encuentra en promedio en 67 %.

Cabe resaltar que los distintos valores de factor de carga entre las plantas de beneficio residen principalmente entre la carga instalada y la carga real utilizada, cuyas razones pueden ser:

- La ampliación de las instalaciones en un periodo próximo.
- El uso momentáneo de equipos para realizar labores, por ejemplo: el uso de cabrestantes, mesas de volteo, mesas de traslación, polipastos, sistemas de bombeo, etc.
- Operación de uno o dos módulos de producción.
- Cantidad de personal operativo.
- Sobredimensionamiento de equipos en módulos de producción y servicios.

Análisis de consumo

El análisis de consumo busca identificar las acciones, las prácticas, los procedimientos y/o el grado de tecnología implementada en la planta de beneficio que afectan el desempeño energético. Dos herramientas son empleadas para el desarrollo de este análisis: la tendencia de consumo y el *benchmarking* del indicador de consumo específico de energía eléctrica.

Tendencia de consumo

Para el análisis se emplea la metodología establecida en la norma ISO 50001, que considera la energía eléctrica no asociada a la producción y los mejores puntos operativos. La energía eléctrica no asociada a la producción es la energía consumida en los procesos que no interfieren directamente en la producción, en donde los consumos se asocian a las pérdidas de energía causadas por baja calidad de la energía eléctrica, la energía usada en el confort operativo de la producción (iluminación, climatización, etc.) y el consumo en áreas administrativas (Grupo de Gestión Eficiente de Energía & Grupo de Investigación en Energías, 2012).

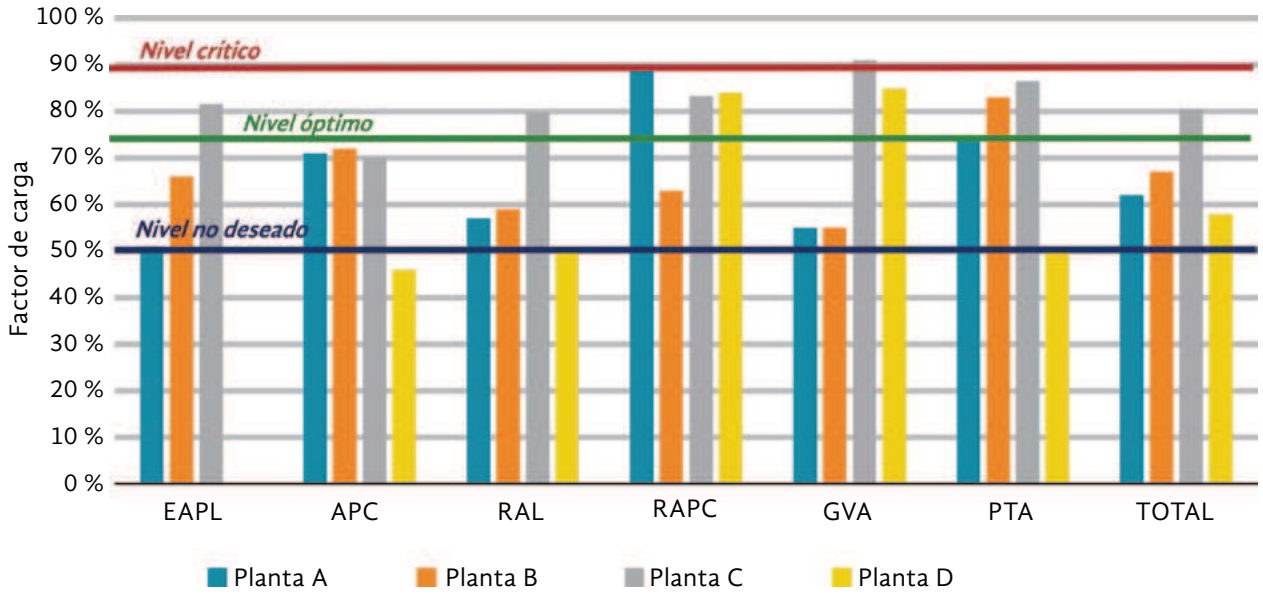


Figura 3. Factor demanda para cada módulo de planta de beneficio.

Por otra parte, los mejores puntos operativos son aquellas operaciones en las cuales se refleja el menor consumo de energía eléctrica durante un periodo productivo; es decir, son periodos durante los cuales la planta de beneficio ha sido más eficiente en el uso de la energía eléctrica.

La Figura 4 presenta la tendencia de desempeño actual y la tendencia de consumo meta para una de las plantas de beneficio estudiadas. Estas tendencias se construyen por medio de un gráfico de dispersión, ubicando la producción en el *eje x* y el consumo de energía para el mismo periodo de tiempo en el *eje y*. El conjunto de datos (puntos azules) establece la tendencia actual (línea roja). Adicionalmente, la tendencia meta (línea verde) se construye a partir de los mejores puntos operativos. De acuerdo con Morvay & Gvozdenac (2008), los mejores puntos operativos son los puntos ubicados en la parte inferior de la tendencia actual (puntos amarillos).

De acuerdo con el caso presentado en la Figura 4, la planta tiene un potencial de reducción del 25 % en energía no asociada a la producción. La oportunidad de mejora se estima a partir de la diferencia de consumo no asociado a la producción de la siguiente forma:

$$\text{Oportunidad de ahorro (\%)} = \left[1 - \left(\frac{\text{Energía meta}}{\text{Energía actual}}\right)\right] * 100$$

Por lo tanto, la oportunidad de ahorro en energía no asociada a la producción se calcula como:

$$\text{Oportunidad de ahorro (\%)} = \left[1 - \left(\frac{36.107\ \text{kWh}}{48.573\ \text{kWh}}\right)\right] * 100 = 25{,}66\ \%$$

Para reducir este consumo se recomienda enfocar el estudio hacia la determinación de las actividades y buenas prácticas realizadas en los meses en los cuales se reflejaron los mejores comportamientos; de esta manera la planta podrá retomar esos escenarios dependiendo de las particularidades que afronte en determinado periodo (temporadas altas y bajas de cosecha para fruto).

Benchmarking de indicadores de consumo específico de energía eléctrica por módulos

El indicador de consumo específico (IC) es la relación entre el consumo de energía y la producción. Para el caso de plantas de beneficio su unidad se da en kWh/t de RFF. El IC se usa principalmente para:

- Rastrear el comportamiento del sistema o proceso.
- Rastrear mejoras en los sistemas que no involucran grandes variabilidades o cambios en la carga base.

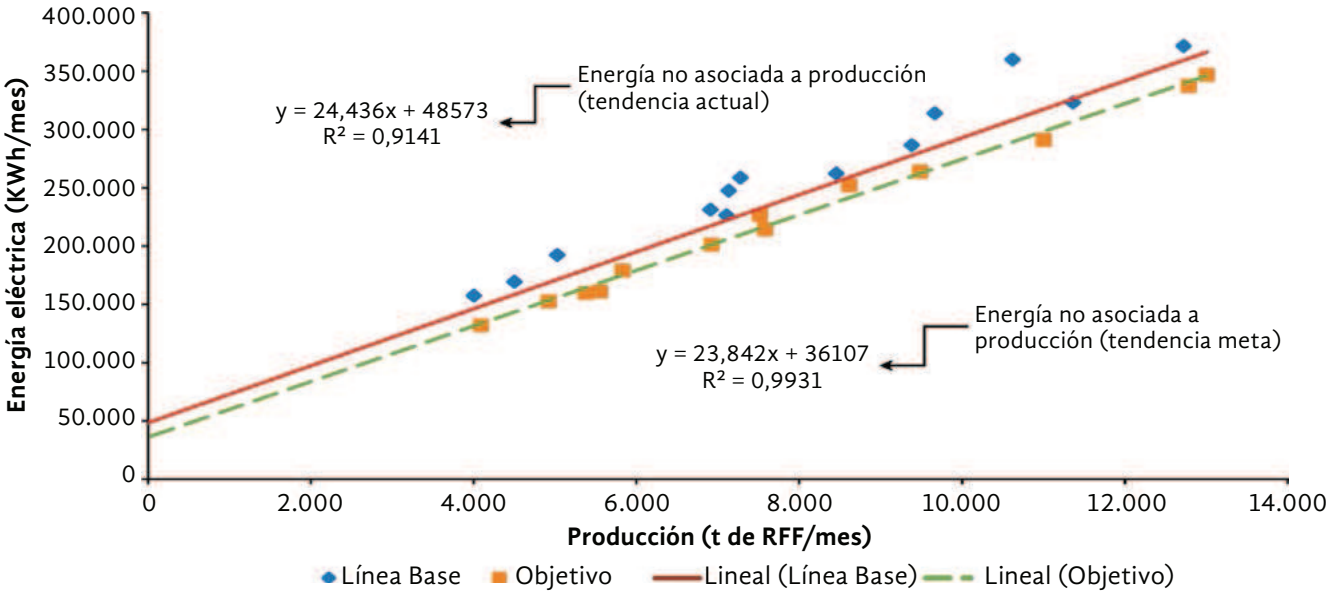


Figura 4. Análisis de datos históricos de producción vs. consumo en planta.

- Evaluar la eficiencia energética de toda una planta, detectar consumo de energía residual o evaluar la efectividad de medidas para mejora.

En la Figura 5 se presentan los indicadores de consumo específico promedio (barra amarilla) calculados durante la etapa de estudio para cuatro plantas de beneficio en cada uno de los módulos de estudio.

El módulo EAPC, que comprende desde la recepción de fruto hasta la clarificación del licor de prensa, presenta para las cuatro plantas estudiadas procesos de extracción de aceite de palma convencionales, con variaciones en las áreas de recepción (fracturación de racimos), desfrutación (mesa de volteo o puente grúa) y clarificación (secado atmosférico, secado al vacío). Se identificó que la implementación de automatismos en el transporte de fruto por vagonetas, el uso de puente grúas o mesas de volteo y el sistema de secado al vacío, afectan directamente el desempeño energético debido a la operación y continuidad de cada proceso. El módulo RAL (recuperado de almendra) presenta un consumo promedio de 4.67 kWh/tRFF; las diferencias presentadas se asocian principalmente al tipo de fruto procesado (híbrido y *guineensis*) y al volumen de producción.

Para el módulo RAPC, en tres de los cuatro casos presentados se recupera aceite de lodos por medio de centrífugas deslodadoras; se incluye un caso donde se utiliza un *tridecanter*. En promedio, la recuperación de aceite por medio de centrífugas requiere de 2.56 kWh/t de RFF. La planta que tenía un sistema de recuperación por *tridecanter*, presentó una disminución de 0.90 kWh por tonelada de fruto procesado.

En cuanto a generación de vapor (GVA), las cuatro plantas de beneficio presentan escenarios de producción diferentes: la planta A cogenera; la planta B solo produce vapor para proceso; la planta C consume toda la biomasa disponible para generar vapor adicional para otro proceso dentro de la empresa; y la planta D tiene un sistema diseñado para cogenerar con una mayor capacidad a la que opera actualmente. Para el tratamiento de agua (PTA) no se apreciaron diferencias, salvo que la planta B contaba con un sistema sobredimensionado.

El módulo no operacional (NO OP.) incluye todo el consumo no asociado a la producción, es decir, oficinas, equipos de mantenimiento, iluminación, etc. De acuerdo con los valores mostrados, el consumo de esta área es el más bajo de todos. Se debe tener en consideración que un indicador similar trazado con diferentes volúmenes de producción diferirá en el consumo neto de energía.

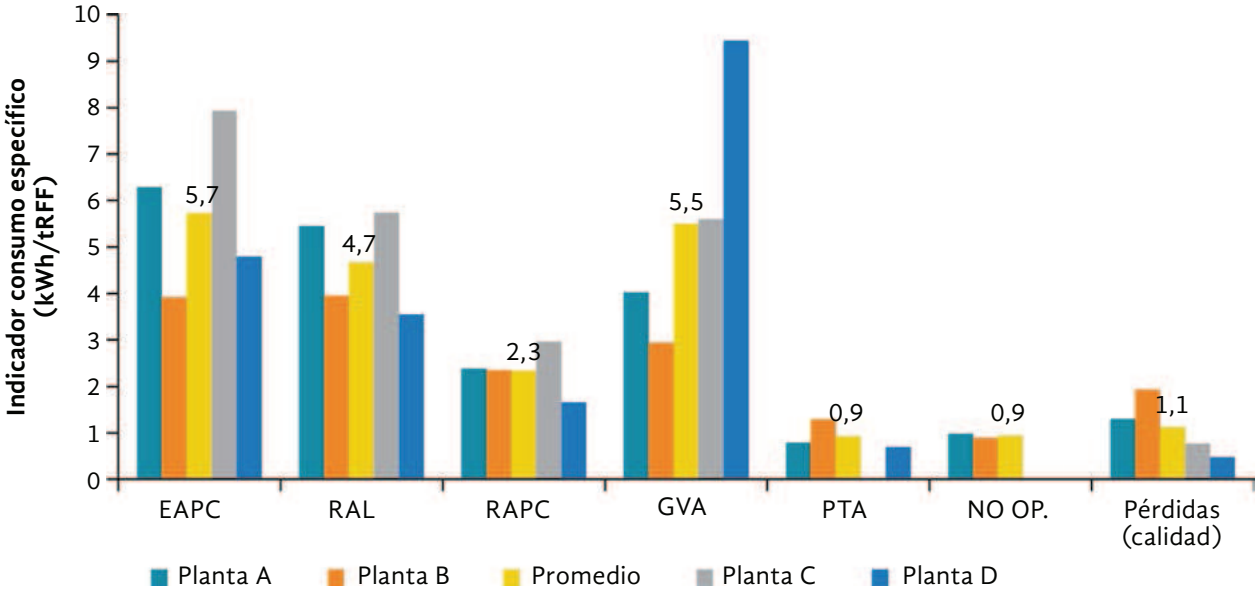


Figura 5. Índice de consumo específico según módulo productivo.

Benchmarking de indicadores de consumo específico de energía eléctrica por áreas

En promedio, el consumo total para las plantas de beneficio estudiadas fue de 22.06 kWh/t de RFF, sin incluir la extracción de aceite de palmiste. La información de consumo se consolidó por áreas de producción de forma descendiente partiendo del área de mayor consumo, la cual fue la generación de vapor (GVA) con un indicador promedio de 5.42 kWh/t de RFF. La información se visualiza en un diagrama de Pareto (Figura 6) con la intención de identificar las secciones en las plantas de beneficio que reflejan el mayor consumo de energía.

De las prácticas operativas e implementación de tecnología en las áreas de la PB se concluye que:

- El secado al vacío incrementa el consumo de energía promedio en 0.51 kWh/t de RFF.
- La mesa de volteo para desfrutado consume 0.6 kWh/t de RFF más que el puente grúa.
- El tipo de material y la edad de la palma afecta el consumo en recuperación de almendra.
- El consumo promedio de picadora de tusa es 0.76 kWh/t de RFF.
- El consumo promedio de prensado de tusa es 1 kWh/t de RFF.
- La recuperación de aceite con *tridecanter* consume 35 % menos que la recuperación con centrífuga.
- No se apreciaron grandes diferencias de consumo de energía entre tratamiento convencional y ósmosis inversa en la planta de tratamiento de agua.

Como se apreció anteriormente, las tendencias de consumo dependerán de las prácticas operativas propias de cada planta de beneficio, por lo tanto, es necesario que cada planta trace sus propios indicadores de consumo específico apuntando hacia diversos objetivos tales como:

- Identificar los módulos de producción y/o servicios con mayor consumo de energía eléctrica.
- Cuantificar las pérdidas eléctricas asociadas a calidad de energía eléctrica.
- Establecer la línea base para la evaluación de escenarios cotidianos frente a decisiones próximas a tomar.
- Detectar anomalías y oportunidades de mejora en el proceso productivo.

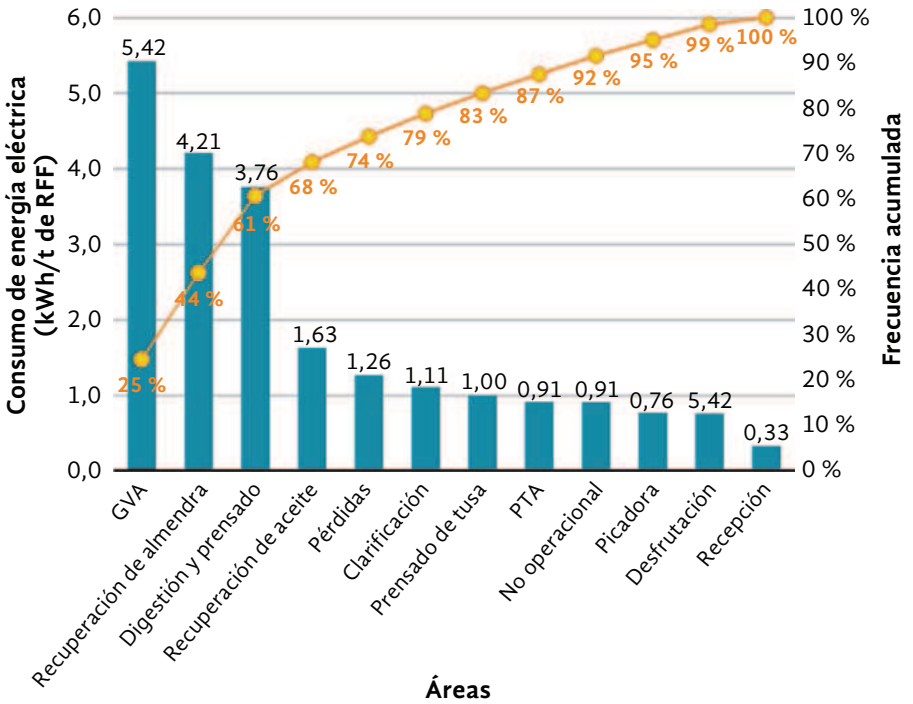


Figura 6. Indicador de consumo de energía por áreas.

Benchmarking de indicadores energéticos a nivel industrial

El *benchmarking* a nivel de industria se puede realizar en diferentes niveles de interés. Siendo el consumo de energía eléctrica objeto de interés, la Figura 7 presenta indicadores específicos de consumo de energía para seis (6) plantas de beneficio, en donde se relacionan los volúmenes de producción promedio. Adicionalmente, se agrega un valor promedio de la producción y el consumo de las plantas de beneficio estudiadas.

En la Figura 7 se aprecia la relación inversa que existe entre el consumo de energía eléctrica y el volumen de producción. Lo anterior infiere la importancia del desarrollo de una logística adecuada para el procesamiento del fruto. Si bien la cantidad de fruta requerida para mantener el proceso estable durante largos periodos es responsabilidad absoluta del personal de campo, garantizar una operación continua asegurará una eficiencia en la utilización de la energía. Por otra parte, el consumo no asociado a la producción, el sobredimensionamiento de equipos y la calidad de la energía eléctrica son aspectos que pueden marcar diferencias, tal como sucede con las planta E y la planta F, las cuales mantienen una producción similar, pero registran diferencias de más de 1 kWh/t de RFF.

Por otra parte, la Figura 8 presenta una comparación entre tecnologías, su relación con la extracción de aceite de palmiste y el consumo de energía de estas. Las tecnologías actuales para la extracción de aceite de palmiste en las plantas de beneficio estudiadas son la extracción físico-química (solventes) y la extracción mecánica (*expeller*). Según información reportada, algunas plantas de beneficio han optado por la extracción mecánica por doble paso utilizando un segundo *expeller* en serie, con el fin de extraer mayor cantidad de aceite.

Para el estudio se presentan los tres procesos de extracción (Figura 8); además se anexan dos casos donde se adiciona almendra comprada junto con la producida en la planta del estudio. Al igual que lo indiciado en la Figura 7, las tecnologías con mayor volumen de producción reflejan mayor eficiencia en el consumo de energía. Sin embargo, desde el punto de vista energético es la extracción con solventes la tecnología más eficiente. La extracción por doble paso consume poco más del 25 % de la energía consumida en el paso sencillo cuando se compra almendra, llegando a consumir hasta el 34 % de la energía utilizando solo almendra propia del proceso.

Análisis de calidad

Dada la importancia del recurso energía eléctrica para la planta de beneficio, la calidad de la energía consumida impactará seriamente el proceso productivo de la extracción de aceite de palma. Los problemas asociados a la calidad de la energía eléctrica en una planta de beneficio pueden derivar del incremento de las pérdidas eléctricas, el deterioro de equipos

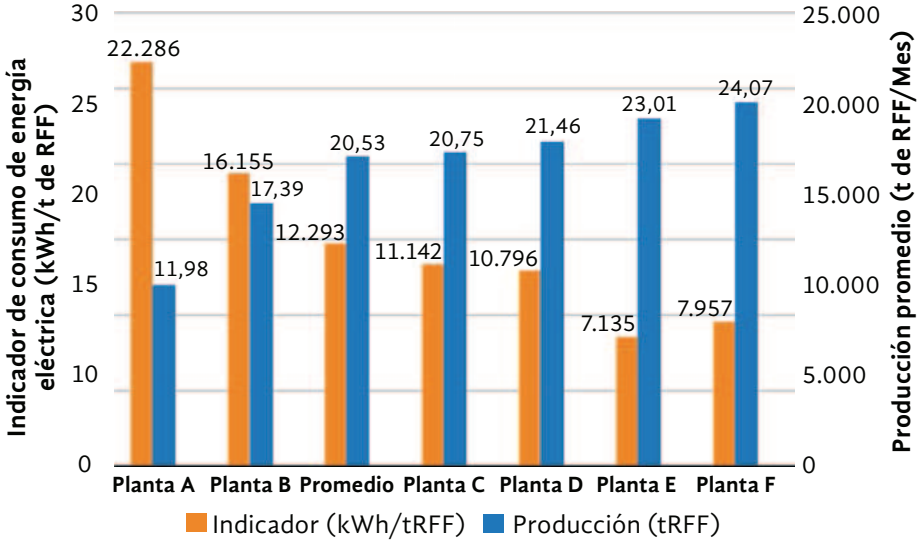


Figura 7. *Benchmarking* indicador de consumo de energía eléctrica en plantas de beneficio.

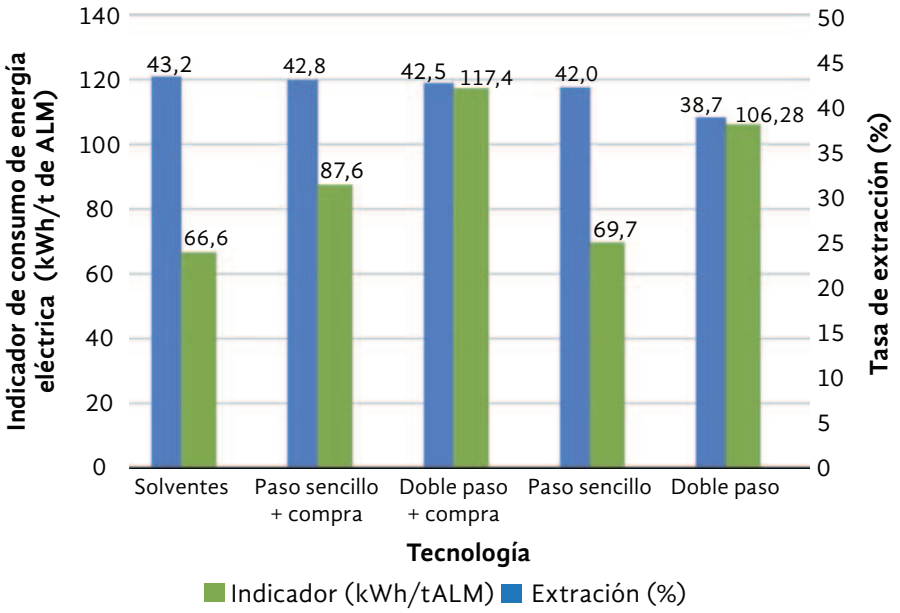


Figura 8. *Benchmarking* extracción aceite de palmiste.

y componentes, incrementos en el costo de mantenimiento y la afectación de la disponibilidad.

Las pérdidas asociadas a la calidad de la energía eléctrica se dividen en cinco tipos:

- Pérdidas por energía activa
- Pérdidas por energía reactiva
- Pérdida en desequilibrios
- Pérdidas a causa de armónicos
- Pérdidas por neutro[2]

En la Tabla 4 se describen las causas comunes a la calidad de la energía.

Las pérdidas en un sistema de distribución de energía para una planta de beneficio resultan ser variables, dado que estas se presentarán en función del tiempo y estarán sujetas a las condiciones de operación y el mantenimiento de los equipos. Si bien es cierto que eliminar las pérdidas de un sistema es imposible, debido a las limitaciones físicas del sistema, el objetivo de la planta de beneficio es mantener estas pérdidas en un nivel mínimo aceptable. La Figura 9 presenta una distribución del promedio de pérdidas de las plantas de beneficio estudiadas.

A partir del diagnóstico se encontraron casos donde las pérdidas por calidad de la energía fueron de 1.93 kWh/t de RFF, siendo 1 kWh/t de RFF el valor promedio. Las causas más comunes para estos casos son la falta de mantenimiento de conductores, grandes distancias entre el centro de control y los motores y la falta de compensación del factor de potencia en tableros.

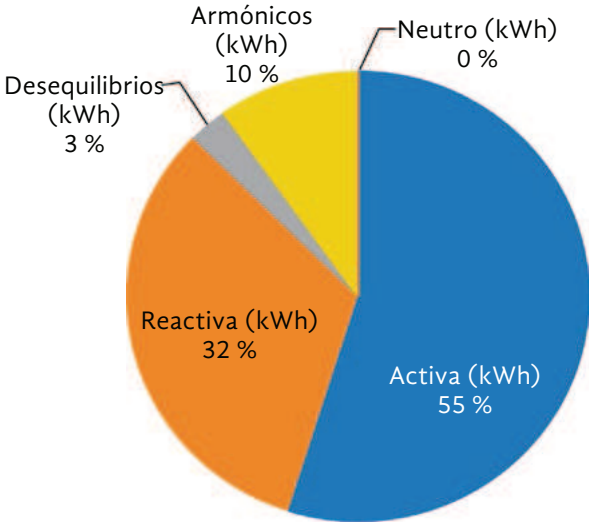
Se debe tener en cuenta que estos valores son propios de cada planta de beneficio, por lo tanto, no se deben esperar comportamientos similares tras la implementación de este tipo de indicadores en otro caso de estudio.

2 No aplica en plantas estudiadas debido a que todas tienen configuración tierra interrumpida.

Tabla 4. Causas comunes de pérdidas asociadas a calidad de la energía.

Activa	Reactiva	Desequilibrio	Armónicos
• Deterioro de conductores • Conductores subdimensionados	• Falta de compensación de factor de potencia • Motores con bajo factor de potencia • Instalación eléctrica	• Fallas de aislamiento • Conexión de transformadores • Cargas monofásicas en redes trifásicas	• Presencia de variadores de frecuencias

Figura 9. Distribución de pérdidas asociadas a la calidad de la energía.



Oportunidad de mejora

Con base en los resultados de los cuatro análisis realizados se ha consolidado la Tabla 5, la cual resume las problemáticas encontradas en el diagnóstico. Adicionalmente, se mencionan las posibles rutas o estrategias para mejorar el desempeño energético en las plantas de beneficio.

Conclusiones

Del diagnóstico presentado se puede concluir que existen potenciales de ahorro en energía eléctrica hasta del 12 %, teniendo en cuenta que para obtener esta reducción basta con implementar buenas prácticas operacionales. De acuerdo con el diagnóstico, las diferencias más representativas en consumo de energía

Tabla 5. Potenciales de ahorros y estrategias de mejora.

Ítems	Identificación del problema	Potencial de Ahorro	Estrategias de mejora
Análisis generación	Intermitencias en el suministro de la energía por parte de proveedor	N/A	• Evaluación de fuentes de energía eléctrica de respaldo menos costosas
Análisis demanda	Sobredimensionamiento de fuerza motriz para equipos	Disposición de potencia <Hasta 600 kW>	• Reducción de fuerza motriz en equipos • Inspección de equipos para verificar su operación • Utilización de excedentes de fuerza motriz en operaciones y proceso alternativos
Análisis de consumo	Desarrollo mínimo planes de medición, corrección y mantenimiento	Reducción en consumo sin reemplazo de tecnología <8 a 10 %>	• Planificación de tiempo para procesos • Operación racional de equipos • Evaluar la integración de alternativas tecnológicas
Análisis de calidad	• Pérdidas por activa • Pérdidas por reactiva • Pérdidas por armónicos • Pérdidas por desequilibrio	Reducción de pérdidas sin inversiones < 1 o 2 %>	• Mantenimiento de redes de distribución, dispositivos de control y acoples mecánicos • Compensación de factor de potencia individualmente por tableros de distribución • Instalación de filtros para contrarrestar efectos de la presencia de distorsiones armónicas

eléctrica estarán ligadas a las maniobras operativas desarrolladas internamente y al grado de tecnología que se encuentre disponible en la planta de beneficio. Por lo tanto, al momento de realizar mediciones más puntuales dentro de la planta de beneficio, discriminar la tecnología utilizada en las instalaciones permitirá desarrollar comparaciones equitativas que demuestren los procesos más eficientes desde el punto de vista del consumo de energía.

Por otro lado, una planta de beneficio que desee administrar efectivamente el uso de su energía deberá conocer cómo y cuánta energía es utilizada en su operación, por lo cual cada empresa deberá constituir su propia matriz de indicadores que les permita observar las tendencias en el consumo del recurso. Indicadores como el factor demanda, la relación potencia instalada y el indicador específico de consumo de energía, son medios que expresan directamente el comportamiento del consumo de energía. Al iniciar un proceso de seguimiento de indicadores se consolida el primer paso de un proceso de mejoramiento continuo para impactar el rendimiento energético del proceso.

El compromiso de cada gerencia, dirección, ingeniería de planta y áreas de procesos demostraron ser imprescindibles para lograr obtener resultados representativos respecto a la metodología planteada frente a la eficiencia en el uso de energía eléctrica. Este tipo de iniciativas y proyectos de mejoramiento a nivel industrial, permiten establecer nuevos paradigmas positivos para contribuir con el futuro energético sustentable de la agroindustria palmera colombiana.

Agradecimientos

Los autores agradecen al personal y a las directivas de las plantas participantes en el proyecto por su dedicación y los recursos suministrados de manera incondicional para el desarrollo de este trabajo, y de manera extensiva a plantas de beneficio en la Zona Norte, la Zona Central y la Zona Oriental. Igualmente al Fondo de Fomento Palmero por incentivar el desarrollo del diagnóstico.

Referencias bibliográficas

APPLUS (2011). *Guía Metodológica para el uso eficiente de la energía en el sector de los alimentos.* Bogotá. n. d.

EOI, Escuela de Negocios & Gas Natural Fenosa (2008). *Manual de eficiencia energética.* Madrid: Gas Natural Fenosa.

Grupo de Gestión Eficiente de Energía & Grupo de Investigación en Energías (2012). *Herramientas para el análisis de caracterización de la eficiencia energética*. Bogotá: UPME.

ISO (2011). *Sistemas de gestión de la energía ISO/FDIS 50001.* Ginebra: ISO.

Lobodovsky, K. (2007). Electric Energy Management. In: *Energy Management Handbook* - Sixth Edition. Lilburn,GA, USA: The Fairmont Press, Inc.

Montero, J. C., Díaz, C. A., Guevara, F., Cepeda, A., & Barrera, J. C. (2013). *Modelo para medición de eficiencia real de producción y administración integrada de información en planta de beneficio.* Bogota: Cenipalma.

Morvay, Z. K., & Gvozdenac, D. D. (2008). *Applied Industrial Energy and Environmental Management.* Croatia: Jhon Wiley and Sons, Ltd.

Stapenhurst, T. (2009). *The Benchmarking Book.* Oxford, UK: Elsevier Ltd.