



DYNA

ISSN: 0012-7353

ISSN: 2346-2183

Universidad Nacional de Colombia

García-Fajardo, María Isabel; Caicedo-Cuchimba, Juan Marcel;
Tobar-Escobar, Vladimir; Flórez-Marulanda, Juan Fernando
Propuesta de auditoría energética para la industria aplicada a un caso de estudio del sector plástico
DYNA, vol. 86, núm. 210, 2019, Julio-Septiembre, pp. 345-354
Universidad Nacional de Colombia

DOI: <https://doi.org/10.15446/dyna.v86n210.76094>

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=49662789044>

- ▶ [Cómo citar el artículo](#)
- ▶ [Número completo](#)
- ▶ [Más información del artículo](#)
- ▶ [Página de la revista en redalyc.org](#)



Sistema de Información Científica Redalyc
Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso
abierto

Energy audit proposal for industry applied to a case study in the plastics sector

María Isabel García-Fajardo ^a, Juan Marcel Caicedo-Cuchimba ^a, Vladimir Tobar-Escobar ^b & Juan Fernando Flórez-Marulanda ^a

^a Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad del Cauca, Popayán, Colombia. garciafajardo@unicauca.edu.co, jflorez@unicauca.edu.co, juanmarcel@unicauca.edu.co

^b Departamento de Smart Grids, GERS, Cali, Colombia. vladimir.tobar@gers.com.co

Received: November 11th, 2018. Received in revised form: July 30th, 2019. Accepted: August 15th, 2019.

Abstract

An electric type 2 energy audit towards the industry sector is proposed based on 4 stages: 1) General review of the organization, 2) Energy assessment, 3) Saving potential identification and 4) Improvement proposals of energy efficiency. Energy assessment is mainly emphasized in which, by means of the ISA-88.01 standard, the data-collection process and its analysis is carried out bearing in mind 4 axes: i) Industry equipment, ii) Electric Installations and power quality, iii) Industrial processes and iv) Industrial habits and practices. The present proposal is applied to a case study of an enterprise from the plastics sector where it is important to mention that: 75% of the total energy consumption is represented by three molding machines. A series of actions are proposed in order to implement in the industry case study and consequently, improving the energy efficiency in 7, 25% and also optimizing production.

Keywords: energy efficiency; energy audit; energy diagnosis; industry; ISA-88.01.

Propuesta de auditoría energética para la industria aplicada a un caso de estudio del sector plástico

Resumen

Se propone una auditoría energética tipo eléctrica de nivel 2 orientada al sector industrial, estructurada en cuatro 4 etapas: Revisión general de la organización, Diagnóstico energético, Identificación del potencial de ahorro y Propuestas de mejora de la eficiencia energética. El énfasis principal está en el diagnóstico energético donde, con el apoyo de la norma ISA-88.01 se realiza la recolección y análisis de la información de planta teniendo en cuenta cuatro ejes: i) Equipos industriales, ii) Instalaciones eléctricas y calidad de la energía, iii) Procesos industriales y iv) Hábitos y prácticas industriales. Se aplica a un caso de estudio de una empresa del sector plástico donde se destaca que: el 75% del consumo de energía total está representado por tres máquinas moldeadoras. Se plantea y aplicó un conjunto de acciones para implementar en la empresa, mejorando la eficiencia energética en un 7,25% y optimizando la producción.

Palabras clave: eficiencia energética; auditoría energética; diagnóstico energético; industria; ISA-88.01.

1. Introduction

En los años 80 debido a los efectos de la crisis del petróleo se iniciaron los desarrollos en Eficiencia Energética (EE), definida como la “relación entre la energía aprovechada y la total utilizada en cualquier proceso de la cadena energética” [1]. En el 2005, países como Dinamarca, España, Estados Unidos, China y otros, establecieron una normativa sobre

gestión energética, que contribuyó a la norma ISO 50001:2011 [2], en alineación con: ISO 9001, ISO 14001 e ISO 22000. La NTC-ISO 50001 es la adopción colombiana de ISO 50001 [3]. El trabajo conjunto entre organizaciones y gobiernos, ha permitido una atmósfera propicia para el desarrollo de estándares y normas sobre gestión energética: UNE-EN 50001:2011 de AENOR, España [4], DIN-EN ISO

How to cite: García-Fajardo, M.I., Caicedo-Cuchimba, J.M., Tobar-Escobar, V. and Flórez-Marulanda, J.F., Energy audit proposal for industry applied to a case study in the plastics sector. DYNA, 86(210), pp. 345-354, July - September, 2019.

50001:2011 del CEN, Alemania [5], ANSI/MSE 2000:2008, Estados Unidos [6], etc.

La EE es de gran interés para la industria moderna, debido a potenciales beneficios económicos, legales y ambientales, pero sólo en el siglo XXI se produjeron los mayores avances al respecto, destacándose: medidas relacionadas con procesos industriales [7], metodologías para la implementación de ISO 50001 [8,9], análisis de modelos de gestión energética [10-14] análisis de tiempos de adopción y penetración de políticas energéticas industriales [15,16] resultados de implementar soluciones energéticas o de EE [17-19], tecnologías para mejorar el desempeño energético y los procesos industriales [20], generación de nuevos modelos de EE [21], y análisis de la EE en procesos industriales [22].

La Auditoría Energética (AE) se ha convertido en una herramienta fundamental para la identificación y priorización de oportunidades para mejorar la eficiencia energética, reducir el desperdicio de energía y obtener beneficios ambientales relacionados. El mayor referente de la AE es la norma ISO 50002, que define el conjunto de requisitos mínimos que se deben desarrollar para la identificación de oportunidades de mejora de la EE. Ésta es útil para la revisión energética que plantea ISO 50001 y para facilitar el seguimiento, medición y análisis de los sistemas de gestión, o puede ser utilizada de manera independiente por una organización que desee identificar las oportunidades de mejora de la EE y desarrollar planes de acción puntuales mediante la contratación de una Empresas de Servicios Energéticos (ESEs) o de manera individual [23]. Sin embargo, el estándar se queda corto en los detalles de cómo realizar la AE en una organización principalmente de tipo industrial, implicando que el desarrollo y éxito de la misma quede sujeta a la experticia o experiencia con la que el auditor o ESE cuenten para el levantamiento y análisis de la información necesaria para el desarrollo de la AE.

Las AE, se pueden clasificar según los procesos estudiados, el tipo de energético utilizado (Auditoría eléctrica o térmica) así como del alcance de la misma: nivel 1: Revisión rápida de las oportunidades de reducir consumos y costos energéticos, nivel 2: Evaluación detallada de las oportunidades de reducir consumos y costos energéticos, requiere el uso de equipos de medida y su alcance puede abarcar la totalidad de los recursos energéticos de la empresa, o solo un tipo de recurso, nivel 3: Evaluación profunda en una sección específica de la empresa llegando al detalle de toma de registros por equipo, medición de otros parámetros como calentamiento en el sistema de distribución del energético, inventario completo y ubicación en planos de los equipos consumidores de energía, análisis de fallas durante un período determinado y otros análisis que requiera la empresa auditada [24]. En este orden de ideas, las AE de nivel 2 y 3 requieren del desarrollo de un Diagnóstico Energético (DE) donde se hace una caracterización y cuantificación detallada de la manera en que se realiza el proceso de consumo energético en la organización [25]. Tanto la AE como el DE tienen como fin determinar el grado de eficiencia con la que es utilizada la energía y actualmente no se hace diferencia entre las dos y generalmente se omiten algunos elementos importantes que se deben tener en cuenta en el entorno industrial, como los diferentes aspectos que

inciden en el consumo energético, que no solo depende de los equipos y la calidad de la energía, sino también de los procesos, hábitos y prácticas industriales. Por ello, es importante plantear para las ESE un procedimiento de recolección y análisis de información global de los diferentes aspectos que inciden en el consumo energético de la industria, que se constituya en una etapa principal para el desarrollo de AE en las empresas industriales.

En este artículo se presenta una propuesta de AE de tipo eléctrica de nivel 2, orientada al sector industrial y se consignan los resultados obtenidos de su aplicación en una empresa del sector plástico de la ciudad de Cali, Colombia. La organización del artículo es la siguiente: En la Sección 2 se presentan las herramientas y etapas de la auditoría energética propuesta. La Sección 3 presenta los resultados obtenidos al aplicar la auditoría energética en la empresa caso de estudio. Finalmente, en la Sección 4 se consignan las conclusiones.

2. Metodología

Se parte de estudios internacionales [23] nacionales [1,14], y locales [26] enfocados en el estudio y análisis del desempeño energético, que brindan herramientas para mejorar la eficiencia energética en las organizaciones, a partir de los cuales se propone una AE de tipo eléctrica para el sector industrial que consta de cuatro (4) etapas: 1) Revisión general de la organización, 2) Diagnóstico energético, 3) Identificación del potencial de ahorro y 4) Propuestas de mejora de la EE, con una actividad extra de Implementación de medidas de EE, para evaluar el impacto de la auditoría (ver Fig. 1).

La AE propuesta, hace énfasis principal en el DE, donde se realiza la recolección y análisis de la información, teniendo en cuenta cuatro ejes principales: i) Equipos industriales, ii) Instalaciones eléctricas y calidad de la energía, iii) Procesos industriales y iv) Hábitos y prácticas industriales; considerados los de mayor impacto energético industrial, que permitirán a cualquier industria saber dónde enfocar las acciones de mejora de la eficiencia energética [27] (ver Fig. 2). Siendo este, un porte a los procedimientos de recolección y análisis de información de AE ya existentes [23].



Figura 1. Etapas de la auditoría energética

Fuente: Los Autores.



Figura 2. Ejes principales de la industria
Fuente: Los Autores.

La aplicación de la AE se realiza en la empresa Empaques Plásticos de Occidente Ltda., (EPO) con actividad económica, fabricación de empaques plásticos domiciliada en Cali, Colombia.

2.1. Revisión general de la organización industrial

Realizar una revisión general al inicio de la AE, permite conocer el tipo de organización y el sector industrial al que pertenece. Mediante visitas, encuestas y entrevistas al personal se recolecta información sobre los productos, procesos de producción, procedimientos, activos físicos, horarios laborales, personal involucrado, etc., a partir de esta información se establece qué información se debe recolectar durante el DE y el alcance de la AE.

La empresa EPO Ltda. cuenta con 9 empleados distribuidos entre la planta industrial, donde se encuentra la infraestructura de producción y el área administrativa, (ver Tabla 1).

Los activos físicos de EPO Ltda. están compuestos por máquinas, equipos de oficina y el sistema de iluminación (ver Tabla 2).

EPO Ltda. cuenta con condiciones de mercado variables, que impiden optimizar sus procesos debido a lotes de producción con tiempos cortos (días o semanas máximo),

Tabla 1.
Personal de EPO Ltda.

Personal	Cantidad	Horario
Administrativo	3	Horario de oficina
Operario	6	Turnos dependiendo de las máquinas que estén en funcionamiento

Fuente: Los Autores.

Tabla 2.
Activos físicos EPO Ltda.

Activos Físicos	Tipo	Cant.
Máquinas	Máquina de moldeo por inyección del plástico	2
	Máquina de moldeo por soplado	3
	Molino de plástico	2
	Sistema de aire a presión	1
	Sistema de enfriamiento de agua	1
Equipos de oficina	Computador de escritorio	1
	Computador portátil	1
	Impresora digital	1
	Balanza digital	1
	Teléfono inalámbrico	1
	Modem	1
	Regulador de voltaje	1
	Iluminación	Lámparas fluorescentes T12
	Claraboyas	3

Fuente: Los Autores.

por lo que el cambio de moldes para los diferentes productos representa una desventaja por los periodos de inactividad que pueden ser entre 3 a 4 horas dependiendo de cada molde.

La planta trabaja de lunes a sábado, 24 horas continuas aproximadamente, y la parte administrativa cumple con horarios de oficina. La producción se concentra en diferentes clases de envases para: lácteos, productos de aseo personal, útiles escolares, recolección de desechos hospitalarios, termos y otros.

El tamaño de EPO Ltda. la cataloga como una PYME (Pequeña y mediana empresa), por lo tanto, se consideran algunas limitantes encontradas en la pequeña industria:

- Dificultad para acceder a tarifas preferenciales por altos consumos de energía eléctrica (tarifas para usuarios no regulados).
- Ausencia de políticas energéticas claras.
- Limitaciones económicas para acceder a nuevas tecnologías, entre otros.

Según la información recolectada anteriormente, se determina que en EPO Ltda. se debe realizar un DE que incluya un censo de carga y mediciones puntuales.

2.2. Diagnóstico energético

El DE permite conocer el estado energético real de la organización y de los procesos industriales. Es la base para identificar los ahorros potenciales y las oportunidades de mejora del desempeño energético, permitiendo enfocar las acciones donde se tiene un mayor impacto energético.

La clave para un DE exitoso radica en la cantidad y calidad de la información recolectada, ésta debe ser recogida de manera clara, ordenada y mediante procedimientos y equipos confiables, ya que información imprecisa dará resultados imprecisos. Durante el DE se debe recolectar:

- Información de procesos de producción: activos físicos, personal, procesos, procedimientos, y en general, todos los aspectos del proceso de producción que influyan en el consumo total de energía en la empresa.
- Información del uso y consumo de energía eléctrica: todo lo relacionado con el desempeño energético al interior y al exterior de la planta o empresa. Abarca información desde el operador de red, instalaciones eléctricas, recursos energéticos, uso y consumo de la energía, etc.

Por esta razón, para una recolección ordenada de la información y un análisis detallado de la misma, se propone tener en cuenta cuatro ejes principales de la industria:

- Procesos industriales
 - Equipos industriales
 - Instalaciones eléctricas y calidad de la energía
 - Hábitos y prácticas industriales
- A partir de los cuales se genera información del uso y consumo de energía, los procesos productivos, activos físicos, personal involucrado y consumos asociados al personal.

Estudiar la industria no es fácil, debido a la complejidad y diversidad de la misma, de sus procesos, de los hábitos del personal, etc. Cada uno de los cuatro ejes propuestos, en sí mismo, es un área difícil con muchas aristas que requiere un manejo especial. Por ejemplo, en el caso de los equipos y

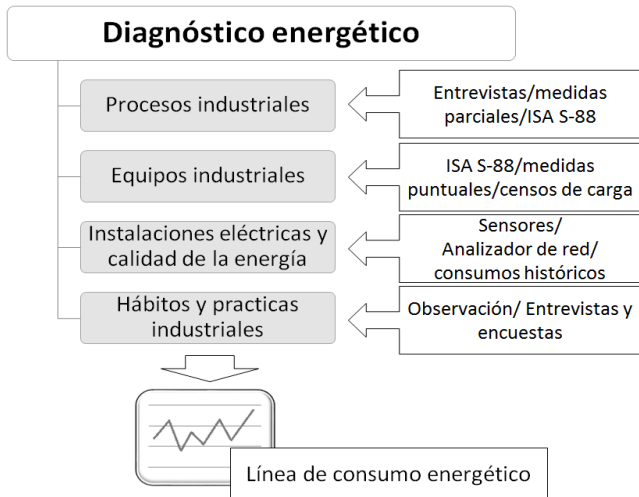


Figura 3. Diagnóstico energético y herramientas necesarias acorde a los cuatro ejes de la industria
Fuente: Los Autores.

maquinaria industrial estos se encuentran disponibles con diversas fuentes energéticas de funcionamiento: vapor, gas, electricidad, etc. Independiente de lo complejo y multifacético de cada eje propuesto, la falta de información industrial confiable y registrada en forma metódica, son las principales dificultades encontradas en la mayoría de industrias.

Para solventar esta situación, el DE propuesto se apoya en el uso de distintas herramientas y estrategias basadas en medición, observación, censos de carga, entrevistas, y principalmente en el uso de estándares ISA [28,29] (International Society of Automation) de modelado industrial que a partir de diagramas (ISA S-5: P&ID Process and Instrumentation Diagrams, PFD Process Flow Diagram) y

modelos (ISA S-88.1: físico, procedimental y de proceso), para levantar de una manera clara y ordenada, toda la información del proceso productivo. De igual manera, es importante incorporar equipos especializados como analizadores de red, para recolectar información de variables que afectan el consumo y la calidad de la energía (ver Fig. 3).

A partir de la información recolectada durante el DE, se establece la línea de consumo energético que permite determinar el desempeño energético actual de la organización y a partir de aquí proyectar los resultados de las medidas de ahorro energético que se implementen.

2.2.1. Procesos industriales

Este eje se enfoca en levantar la información sobre los procesos industriales generando mapas de procesos energéticos, modelos y diagramas productivos. Se propone realizar:

- Entrevistas: a los operarios, para documentar sus procedimientos, además, esto sirve como insumo del eje de hábitos y prácticas industriales.
 - Diagrama de flujo de proceso: Se identifican los procesos productivos y se realiza un PFD para cada uno de ellos.
 - Modelo de Proceso: los PFD son el insumo para obtener estos modelos, cada PFD genera un modelo de proceso.
 - Modelo de Control Procedimental: con la información recopilada previamente, se realiza este modelo, sin embargo, es necesario que los procedimientos realizados por los operarios en los procesos industriales, sean revisados por expertos.
 - Inventario de productos: registro donde se consigna la información de los productos, sus características, ciclos de producción, unidades producidas y materias primas.
- EPO Ltda., cuenta con tres procesos principales: inyección, soplado y molienda.

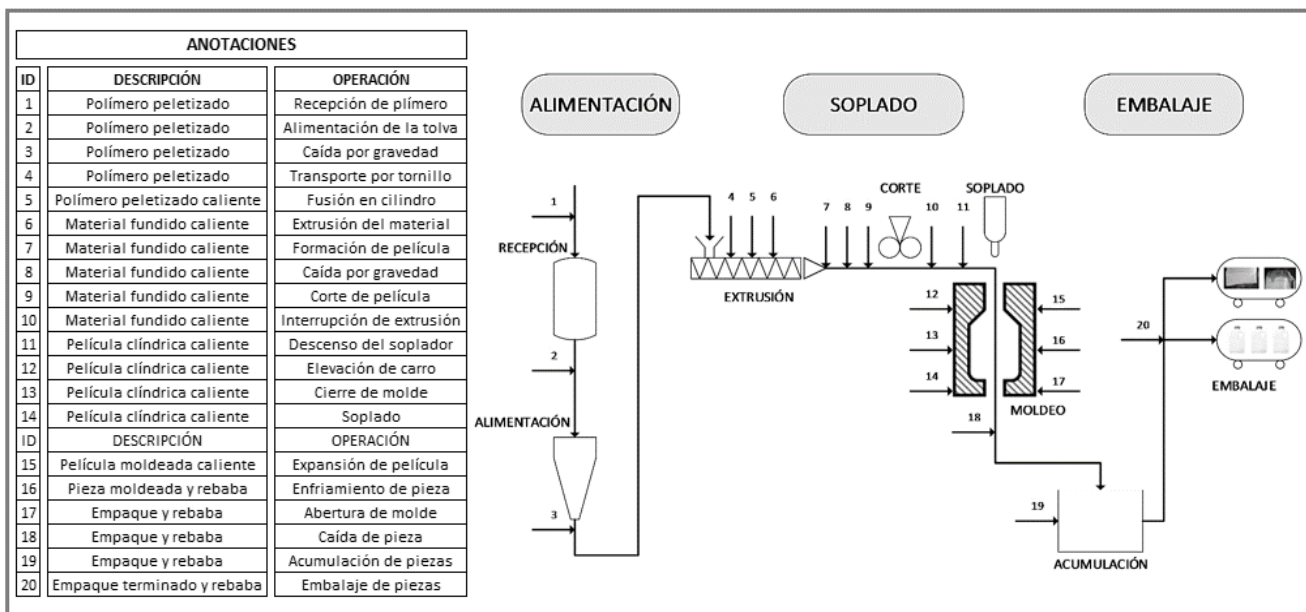


Figura 4. Diagrama de flujo por operaciones del proceso de moldeo por soplado
Fuente: Los Autores.

El consumo de energía del sistema de iluminación y de los equipos de oficina, en comparación con el consumo energético de las máquinas industriales, es mucho menor, por lo tanto, el DE se enfoca principalmente en los procesos y equipos de producción.

Teniendo en cuenta los tres procesos industriales principales de EPO Ltda., y a partir de visitas a la planta física de la empresa, observar detalladamente el proceso en las respectivas máquinas y entrevistarse con los operarios y el personal pertinente, se obtuvo la información necesaria para realizar el diagrama de flujo de cada proceso. Debido a la complejidad y extensión de los mismos, en este artículo se presenta únicamente el diagrama de flujo por operaciones del proceso de moldeo por soplado, (ver Fig. 4).

Una vez levantada la información de los tres procesos, es organizada en diagramas según el modelo de proceso de ISA-88.01. Obteniendo los diagramas de modelo de proceso de: moldeo por inyección, moldeo por soplado y molienda. Por complejidad y tamaño de los mismos consultar [27].

2.2.2. Equipos industriales

Este eje se enfoca en levantar información de la maquinaria y equipos utilizados en la empresa, principalmente los involucrados en los procesos industriales. A continuación, se presenta las herramientas que se utilizan:

- Diagrama de proceso e instrumentación: para identificar los módulos de control, módulos de equipo y unidades de la línea de proceso.
- Modelo Físico: para identificar sitios, áreas, procesos y equipos de la empresa. Adicionalmente facilita
- registrar información del estado de mantenimiento y protección de los equipos y máquinas.
- Censo de carga: realizar un inventario de la maquinaria utilizada en las diferentes áreas y procesos, registrando parámetros, tiempo de funcionamiento y energéticos utilizados.
- Medidas puntuales: Según las características de los procesos y la maquinaria existente, se debe utilizar instrumentos de medida instantánea (pinza voltiamperimétrica), o instalación de medidores durante

un periodo de tiempo con el fin de registrar el consumo energético del equipo haciendo sub medición.

Para levantar en detalle la información de los activos físicos, principalmente los de la planta de producción, se parte de los modelos ISA-88.01. La Fig. 5 describe el modelo físico de la planta de producción.

La información de cada uno de los procesos productivos de EPO Ltda., se consigna en tablas aplicando ISA-88.01, es decir, célula de proceso, unidad, módulo de equipo y módulo de control, además del adicional: elementos principales.

Para el proceso de molienda, el modelo físico tiene 1 célula de proceso, 4 unidades, 6 módulos de equipos, 14 módulos de control (aunque muchos se repiten, se dejaron así para la correspondencia entre los modelos ISA-88.01) y 14 elementos principales (ver Tabla 3).

El inventario de los equipos que se encuentran en la planta de EPO Ltda., y su consumo respectivo se encuentra registrado en una tabla que recoge la información del censo de carga, incluyendo la potencia, el consumo promedio que presentan de acuerdo al tiempo de uso y otros datos importantes. En la Tabla 4 se presenta una parte de la información del censo de carga. Se desataca que las nueve lámparas fluorescentes presentan un consumo mensual de 740kWh al mes.

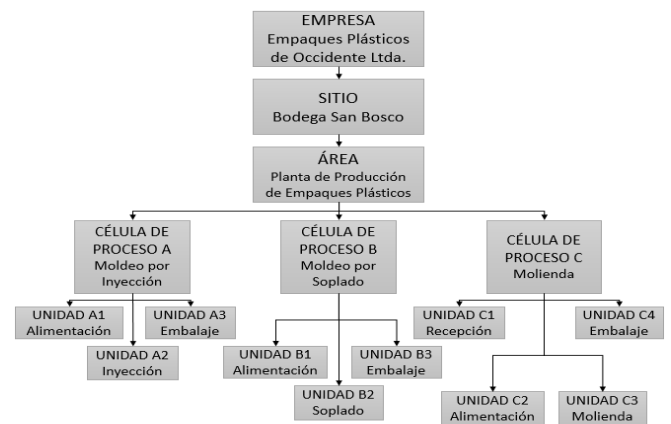


Figura 5. Modelo físico de la empresa EPO Ltda.
Fuente: Fuente: Los Autores.

Tabla 3.
Modelo físico de la unidad de molienda.

Célula de proceso	Unidad	Módulo de equipo	Módulo de control	Elementos principales	
	Unidad de recepción	Módulo de recolección	Operario	Bolsas	
		Módulo de almacenamiento	Operario	Bolsas	
	Unidad de alimentación	Módulo de alimentación	Operario	Operario	Carro carga
			Operario	Operario	Carro carga
Célula de proceso de molienda	Unidad de molienda	Módulo de molienda	Operario	Manual	
			Operario	Elementos de limpieza	
			Operario	Manual	
			Operario	Interruptor mecánico	
	Unidad de embalaje	Módulo de acumulación módulo de embalaje	Motor	Cuchillas	
			Motor	Correas	
			Motor	Manual	
			Operario	Canasta	
			Operario	Bolsas	
			Operario	Carro de carga	

Fuente: Los Autores.

Tabla 4.
Censo de carga en EPO Ltda.

Área	Equipo	N°	Potencia	Uso (h/día)	Uso (día/mes)	Energía consumida al mes (kWh)
Planta de producción	Máquina inyectora 1	1	12kW+2kW(10,439kW)	0	-----	-----
	Máquina sopladora Hesta	1	10HP(7,457kW)	23	8	1.372
	Máquina sopladora grande 1	1	20+15HP(26,099kW)	23	20	12.005
	Máquina sopladora Bekum	1	7,7+7,5kW	23	20	6.992
	Máquina inyectora 2	1	11kW+580W	23	10	3.864
	Molino grande	1	24HP(17.89kW)	2	6	214,68
	Compresor rojo	1	5.595kW	24	24	3.222
	Chiller	1	1kW+3kW	24	24	2.304
	Molino pequeño	1	6,6HP(4,92kW)	1,5	8	59,04
Oficinas	Lámparas fluorescente T12 (240cm)	4	2*75W+9W	24	30	251
	Equipo de oficina	2	2kW	8	24	384

Fuente: Los Autores.

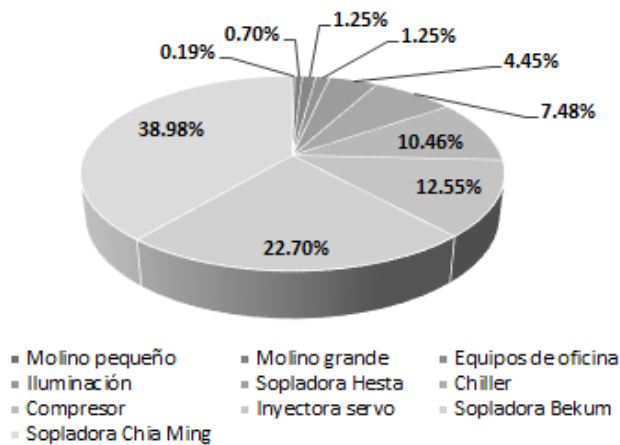


Figura 6. Distribución consumo total (kWh) de la planta de EPO Ltda.
Fuente: Los Autores.

Mediante la instalación de medidores en cada una de las maquinas, se identifican los consumos parciales, donde la sopladora Chia Ming, la sopladora Bekum y la inyectora con servomotor, representan el 74,23% del consumo total de la planta de producción (ver Fig. 6).

2.2.3. Instalaciones eléctricas y calidad de la energía

Este eje se centra en analizar el estado de las instalaciones eléctricas de la organización, principalmente en áreas donde hay mayor concentración de equipos y procesos, así como de la calidad de la energía suministrada al interior y al exterior de la organización. A continuación se presenta las actividades a realizar:

- **Análisis de calidad de energía:** con un analizador de red para detectar el estado de los circuitos eléctricos, la calidad interna de la energía y descartar una posible relación entre consumos energéticos y variables de calidad (como un bajo factor de potencia, armónicos, etc.). igualmente determinar la calidad externa de la energía suministrada por el operador de la red eléctrica.
- **Chequeo eléctrico:** se revisa el estado de tomacorrientes, cables, extensiones, tableros de distribución y subestaciones, adicionalmente el uso de cámaras

termografías permite detectar puntos calientes y potenciales sobrecalentamientos en motores.

- **Consumo energéticos históricos:** de al menos tres años atrás, principalmente, de sus plantas industriales.

Para el caso de EPO Ltda. el levantamiento de información se hace en dos partes, una correspondiente a las instalaciones eléctricas y la otra correspondiente a la calidad de la energía.

- **Instalaciones eléctricas**

Se siguieron algunas condiciones de calidad sugeridas en el RETIE [30], a partir de las cuales se encontraron situaciones como: conductores no estandarizados, no existe tablero de distribución, no hay sistema de puesta a tierra, existe una combinación de conductores de diferentes calibres, etc.). Todo esto incide negativamente en el funcionamiento de los equipos y provocan pérdidas, deterioro y disminución de su vida útil.

- **Calidad de la energía**

En la calidad de la energía se enfatiza en la calidad de potencia eléctrica suministrada, este factor se relaciona con el aumento de la productividad y la mejora en la EE. Se utiliza el analizador de red Dranetz HDPQ VISA [31] recopilando 21 días de datos de la red eléctrica de EPO. Para la conexión del analizador de red se utilizó la configuración típica trifásica en estrella, debido a las condiciones eléctricas encontradas en EPO Ltda. con un factor de escala en 1, porque la medición se realizó directamente (ver Fig. 7).

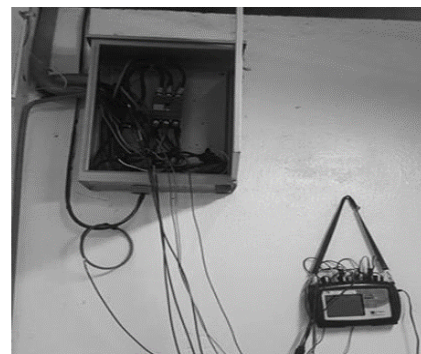


Figura 7. Conexión del analizador de red Dranetz.

Fuente: Los Autores.

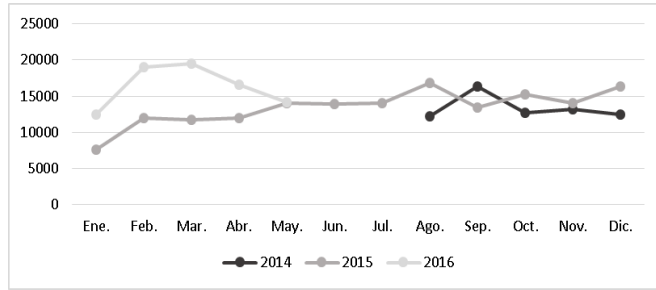


Figura 8. Consumo energía activa de EPO (2014-2016).
Fuente: Los Autores.

El análisis se basa en la calidad de potencia eléctrica suministrada, centrado en la forma de onda en tensión y corriente, niveles de tensión, desequilibrio en tensión y corriente, distorsión armónica y factor de potencia. Encontrando que: (i) Formas de onda en tensiones: son perfectamente sinusoidales, resultado de una buena calidad de potencia eléctrica suministrada. (ii) Formas de onda en corrientes: no son sinusoidales, debido a la presencia de distorsión armónica, a la naturaleza de las cargas y al desbalance de las fases. (iii) Bajos niveles de tensión: se registraron en eventos causados por el arranque de motores grandes y una pobre calidad del factor de potencia, sin embargo, estos niveles de tensión no representaron peligro para los equipos, principalmente a causa de la duración de los eventos. (iv) Registro de eventos: Se registraron 256 eventos, ninguno de ellos fuera de la zona que representaría algún peligro para la maquinaria.

- Consumo energético

El historial de consumo de energía eléctrica (2014 - 2016), presenta un comportamiento creciente, con un consumo promedio mensual de 14308.33kWh. A principios de 2016 aumentó drásticamente el consumo, (ver Fig. 8), pero debido al deficiente registro de información de producción y del desempeño energético de la planta, no se cuenta con documentación necesaria para comprender las causas de dicho comportamiento.

2.2.4. Hábitos y prácticas industriales

Observar y entrevistar a los operarios para identificar cómo interactúan con los procesos y equipos, y determinar su influencia en excesos de consumo energético. Esta información se complementa con los modelos de proceso y de control procedimental, para un análisis de los hábitos y prácticas del personal relacionado en los procesos productivos de la empresa.

Se realizan entrevistas tanto al propietario de EPO Ltda como al personal del área de producción. Se destaca que el dueño es quien más conocimiento tiene sobre las áreas, procesos y equipos de EPO Ltda., gracias a esto se pudo realizar el levantamiento de la información requerida en la etapa anterior y para los ejes de Procesos y Equipos industriales, sin embargo, no existía ningún tipo de información documentada al respecto.

2.2.5. Línea de consumo energético e indicadores energéticos

A partir de las curvas de consumo energético, producción y tiempo, se realiza un análisis del uso y consumo de la energía, así:

- Gráfico de consumo de energía vs tiempo: proporciona un promedio de la demanda energética en periodos de mayor y menor consumo de energía.

- Gráfico de consumo de la energía vs producción: evidencia la cantidad de energía utilizada actualmente en la producción, por lo que los datos de producción deben corresponder con el mismo periodo de los datos del consumo de energía.

- Gráfico de línea de consumo energético: Resulta de la combinación de los gráficos de consumo de energía vs tiempo y consumo de energía vs producción.

Con la línea de consumo energético se conoce el comportamiento de los recursos energéticos utilizados en la empresa, si las áreas y/o equipos cuentan con medidores de energía eléctrica también es posible conocer su comportamiento. Estas gráficas son el insumo principal para evaluar los resultados obtenidos al implementar las medidas de ahorro energético.

Con los resultados del DE, especialmente el gráfico de línea de consumo, se elabora una serie de indicadores energéticos (IEs) que caracterizan el comportamiento del uso y consumo de la energía en la organización. Estos IEs dependerán en gran parte del grado de agregación o desagregación de la información que permita evaluar el uso de la energía de forma cualitativa o cuantitativa.

A partir del consumo energético por unidad de producción en EPO Ltda., se obtienen dos gráficas: comportamiento energético y comportamiento de producción. La energía no asociada a producción es mínima, por lo que el consumo energético es directamente proporcional a la producción, (ver Fig. 9)

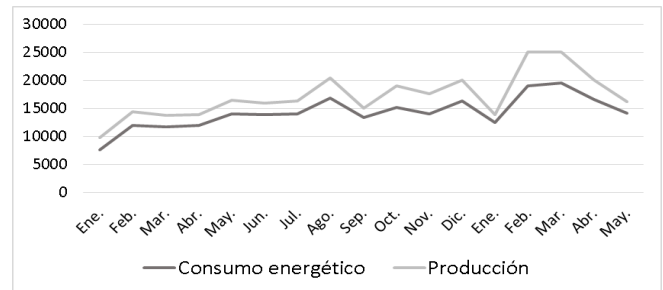


Figura 9. Superposición línea de consumo energético y línea de producción.
Fuente: Los Autores.

Tabla 5.
Principales indicadores energéticos para EPO Ltda.

Elemento	Indicador Energético
Proceso inyección máquina San Shun	IE(pa)= 6,0 kWh/8,64 kg = 0,690 kWh/kg
Proceso soplado máquina Chia Ming	IE(pa)= 7,9 kWh/4,58kg = 1,958 kWh/kg
Máquina sopladora Bekum	IE(pa)= 8.1 kWh/4.58kg = 1,772 kWh/kg
Máquina sopladora Hesta	IE(pa)= 5.9 kWh/3,876kg = 1,52 kWh/kg

Fuente: Los Autores.

Se plantearon los siguientes IEs: (i) IE de nivel 2 “producción/consumo energético”: relaciona la cantidad de producto procesado por consumo energético (kg/kW), (ver Tabla 5), (ii) IE de nivel 3 “consumo específico para polímeros amorfos semi-cristalinos”. La referencia en consumo energético está entre 0,20 kWh/kg y 0,25 kWh/kg.

2.3. Identificación del potencial de ahorro

La información recolectada y procesada durante las etapas anteriores permite identificar cómo se distribuye el consumo de energía eléctrica entre los distintos procesos, equipos, líneas de producción, etc., insumo principal para identificar cuáles son los potenciales de ahorro energético de la organización. Para ello se debe tener en cuenta:

- Dónde se encuentra el mayor consumo de energía eléctrica
 - Si realizar acciones inmediatas o a corto plazo
 - Seleccionar las acciones (factibles) que impliquen una mayor disminución del consumo de energía
 - Las acciones a implementar no afecten los procesos productivos ni el confort o seguridad del personal

Teniendo en cuenta que en EPO Ltda. el consumo mensual de energía correspondiente al sistema de iluminación es de 740kWh, el cambio de luminarias fluorescentes por luminaria Led, es una acción de bajo costo que puede ser implementada fácilmente y cuyo beneficio se evidenciará inmediatamente. Con el cambio de luminarias, se proyecta un ahorro energético mensual de 413,64 kWh que representa el 51,55% del consumo total del sistema de iluminación de EPO Ltda. (ver Tabla 6).

Se propone el uso de guías especializadas organizadas para cada eje: i) Guía de equipos, ii) Guía de procesos industriales, iii) Guía de instalaciones eléctricas y calidad de

la energía (IE&CE) y iv) Guía de hábitos y practicas industriales (H&P), para facilitar la identificación de potenciales de ahorro y generar planes de acción para mejora del desempeño energético de la organización [27].

- **Guía de Equipos:** Con información suministrada por los fabricantes de equipos, etc., como referencia para el correcto funcionamiento de la maquinaria industrial.
- **Guía de procesos industriales:** Presenta información de los procesos típicos de una industria, para el caso de estudio, se presenta la información de los procesos de una industria del plástico.
- **Guía de IE&CE:** recopila información técnica de buenas prácticas en las instalaciones eléctricas industriales y los niveles de calidad de energía necesarios. Debe estar respaldado por normas, reglamentos, etc., como RETIE y RETILAP [32].
- **Guía de H&P:** con de buenos hábitos y prácticas industriales, incluyendo acciones e indicadores, encaminados a mejorar los procesos que involucran directamente al personal. Esta guía, está estrechamente relacionada con la Guía de Procesos, siendo una base para la guía de H&P.

A partir del cruce de información entre las cuatro guías especializadas y la información recolectada sobre los cuatro ejes, se genera una lista de acciones enfocadas a mejorar el desempeño energético de los procesos de EPO Ltda.

En general, se recomienda que cada industria tenga sus propias guías especializadas, acompañadas de expertos encargados de revisar y analizar dicha información.

2.4. Propuestas de medidas de EE

Se organizan planes de acción que pueden comprender desde mejorar los hábitos de consumo del personal, modificar

Tabla 6. Consumo proyectado después del cambio de luminarias.

Lámpara fluorescentes	Pot. Total Fluoresc. (Watts)	Lámparas Led	Uso (h/día)	Potencial de ahorro				
				Pot. total led (Watts)	Energía fluor. (kWh)	E. proyectada led (kWh)	Energía ahorrada (kWh)	Factor ahorro
T12 240cm	636	T8 20w	24	320	458	230,4	228	49,69%
T12 120cm	348	T8 20w	24	160	251	115,2	135	54,02%
T12 120cm	87	T8 20w	12	40	31	14,4	17	54,02%
Ahorro total proyectado en iluminación							413,64	51,55%

Fuente: Los Autores.

Tabla 7. Listado de acciones propuestas para EPO Ltda.

Elemento	Sugerencias
Inyectora San Shun eficiencia alta e Inyectora San Shun eficiencia media	Instalar sistema de calefacción inductivo con aislamiento térmico. Instalar filtros activos para suprimir armónicos.
Sopladora Hesta	Considerar rebobinado o reemplazo por motor de alta eficiencia con variador de velocidad y control de soplado.
Sopladora Chia Ming	Cambiar motor del sistema extrusor por uno de alta eficiencia con un sistema de arranque suave. Instalar sistema de calefacción inductivo con aislamiento térmico. Instalar filtros activos para suprimir armónicos. Incorporar variador de velocidad en conjunto con un sistema de control para el sistema hidráulico.
Sopladora Bekum	Incorporar un PLC y control de soplado. Cambiar motor del sistema extrusor por uno de alta eficiencia con variador de velocidad. Instalar un sistema de calefacción inductivo con aislamiento térmico. Instalar filtros activos para suprimir armónicos. Incorporar un variador de velocidad y un sistema de control para el sistema de hidráulico.
Máquinas moldeadoras, compresor y chiller	Evitar obstrucciones de los ductos, mangueras, etc., que impidan la circulación de agua y aire. Reemplazar correas en mal estado por correas de alta eficiencia y alineadas.

Fuente: Los Autores.

Tabla 8.
Acciones implementadas en EPO Ltda.

Acción	Descripción
Instalar banco de capacitores. Pruebas de producción	Se diseñó e implementó un banco de capacitores para mejorar el factor de potencia ($Pf=0.81$ por método vectorial), con ello se consiguieron mejoras en la EE del 7,25% sobre el consumo energético total dada la reducción porcentual de las corrientes. Se realizaron pruebas de producción para el proceso de extrusión soplado en las cuales se fabricaron ciertas referencias de envases plásticos cuyos lotes de producción no solo estaban asociados a una máquina específica. <ul style="list-style-type: none"> Ejemplo: En la fabricación de un envase 200cc en la máquina Hesta (1 litro) con $IE(pa)=1.522$ Kwh/kg comparada con la máquina Bekun (3 litros) con $IE(pa)=1.77$ kwh/Kg para un lote de producción de una tonelada representaría una reducción del consumo energético en 558 kw en un periodo de producción de 24 días, esto sería equivalente a una reducción del 3,42% respecto al promedio de consumo del año 2016 en EPO [25]
Producción por lotes grandes	EPO implementó estrategias económicas para incentivar al cliente al emitir órdenes de compra por grandes lotes de producción, esto limita tiempo muertos de producción por cambio de moldes. De esta manera se reducen costos que se pueden reflejar en una tarifa más competitiva en el precio final del producto. De acuerdo al desarrollo hecho en [28] con esta estrategia se podría reducir hasta en 13.14 horas en tiempos muertos en un periodo de 21.94 días de producción (equivalente a 4.35 ciclos de producción).

Fuente: Los Autores.

los procesos industriales, cambiar equipos, eliminar áreas, equipos o procedimientos ineficaces, hasta la instalación de sistemas de autogeneración o cogeneración, entre otros. Todas estas acciones deben ir encaminadas a mejorar el desempeño energético de la organización.

Las medidas de EE se organizan 1) según el efecto que tienen en el desempeño energético de la organización industrial, 2) según el tiempo de obtención de resultados, esto es, medidas de EE de corto, mediano o largo plazo, y 3) Según la inversión requerida para su implementación.

Para EPO Ltda. se propone realizar una serie de acciones enfocadas principalmente a los equipos industriales que beneficiarán el proceso de producción. La Tabla 7 resume las principales acciones propuestas.

2.5. Implementación de medidas de EE

Generalmente las acciones que requieren inversiones bajas o nulas como la mejora de los hábitos de consumo, no influyen significativamente en el desempeño energético de organizaciones industriales, es decir, el ahorro obtenido es mucho menor al derivado de la ejecución de acciones que requieren de inversiones económicas significativas como el cambio de equipos industriales o modificaciones de las líneas de producción. Por lo tanto, la implementación de las medidas de EE dependerá de las necesidades de la organización. Adicionalmente, estas acciones deben estar ligadas a unos IEs, que dan seguimiento al efecto que tiene su implementación en la planta industrial.

3. Resultados y discusión

3.1. Implementación de medidas de EE

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos durante la AE realizada y las condiciones económicas de EPO Ltda., se implementaron una serie de acciones que permitieron mejorar el desempeño energético y reducir el consumo de energía en la organización. La Tabla 8 presenta las acciones implementadas en EPO Ltda., y los beneficios obtenidos.

4. Conclusiones

Se propuso una auditoría energética de tipo eléctrica y de nivel 2, orientada al sector industrial, que permite realizar el levantamiento de información de manera organizada y sistemática, un diagnóstico energético detallado y generar acciones enfocadas a mejorar el desempeño energético, alrededor de cuatro ejes: equipos industriales, instalaciones eléctricas y calidad de la energía, procesos industriales y finalmente, hábitos y prácticas industriales. Se aplicó a una empresa del sector plástico, permitiendo conocer aspectos de la problemática energética nacional que enfrenta la industria; y concibiendo que en muchas organizaciones no prima la solvencia económica, resulta determinante mejorar continuamente los procesos, el desempeño energético y reducir costos operacionales, para mantenerse a flote bajo las exigencias del mercado. Finalmente, se implementaron una serie de acciones con las que se consiguieron mejoras en la producción y en la EE del 7,25% en EPO.

Agradecimientos

Este trabajo contó con la colaboración del Ingeniero José Enar Muñoz de la empresa GERS, quien facilitó el analizador de red Dranetz Power Visa para el desarrollo de este proyecto.

Referencias

- [1] Campos-Avella, J.C., Lora-Figueroa, E., Meriño-Stan, L. y Tovar-Ospino, I., Sistema de gestión integral de la energía. Guía para la implementación, MINMINAS-UPME, Bogotá, 2008.
- [2] Dzene, I., Polikarpova, I., Zogla, L. and Rosa, M., Application of ISO 50001 for implementation of sustainable energy action plans, Energy Procedia, 72, pp. 111-118, 2015. DOI: 10.1016/j.egypro.2015.06.016.
- [3] Sistemas de Gestión de la Energía - Requisitos con orientación para su uso, Norma Técnica Colombiana NTC-ISO 50001, 2011.
- [4] Sistemas de Gestión de la Energía, AENOR, UNE-EN ISO 50001, 2011.
- [5] Norma de Gestión Energética Alemana, CEN, DIN-EN ISO 50001, 2011.
- [6] Sistemas de Gestión Energética, ANSI/MSE 2000, 2008.
- [7] Giaccone, E. and Mancò, S., Energy efficiency measurement in industrial processes, Energy, 38(1), pp. 331-345, 2012. DOI: 10.1016/j.energy.2011.11.054
- [8] Frozza, J., Lafay, J., Baldin, V. and Marangoni, F., Metodologia de implantação de um sistema de gestão de energia utilizando ABNT NBR ISO 50001, VIII Congresso Nacional de Excelência em Gestão, pp. 1-28, 2012.

- [9] Jovanović, B. and Filipović, J., ISO 50001 standard-based energy management maturity model - proposal and validation in industry, *Journal of Cleaner Production*, 112, pp. 2744-2755, 2016. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.10.023
- [10] Rosero, J., Téllez, S. and Prias, O., Integral energy management for industrial process, *Rev. Visión Electrónica*, 7(2), pp. 175-184, 2013. DOI: 10.14483/22484728.5523
- [11] Vanegas-López, J.G. y Castaño-Rojas, J.G., Modelos de gestión energética: revisión de algunas experiencias internacionales y perspectivas para Colombia, *Trilogía*, 6, pp. 77-92, 2012.
- [12] Zhou, L., Li, J., Li, F., Meng, Q., Li, J. and Xu, X., Energy consumption model and energy efficiency of machine tools: a comprehensive literature review, *Journal of Cleaner Production*, 112, pp. 3721-3734, 2016. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.05.093
- [13] Universidad del Atlántico y Universidad Autónoma de Occidente, Sistema de gestión integral de la energía-guía para la implementación. Editado por la UPME, Diciembre, 2007.
- [14] Castrillón, R., Quispe, E.C., González, A., Fandiño, D. y Urhan, M., Una metodología para la implementación del sistema de gestión integral de la energía. 1^{ra} Ed., Universidad Autónoma de Occidente, 2014.
- [15] Cao, X., Wen, Z., Chen, J. and Li, H., Contributing to differentiated technology policy-making on the promotion of energy efficiency technologies in heavy industrial sector: a case study of China, *Journal of Cleaner Production*, 112, pp. 1486-1497, 2016. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.05.028
- [16] Fleiter, T., Hirtzel, S. and Worrell, E., The characteristics of energy-efficiency measures-a neglected dimension, *Energy Policy*, 51, pp. 502-513, 2012. DOI: 10.1016/j.enpol.2012.08.054
- [17] Abeelen, C., Harmsen, R. and Worrell, E., Implementation of energy efficiency projects by Dutch industry, *Energy Policy*, 63, pp. 408-418, 2013. DOI: 10.1016/j.enpol.2013.09.048
- [18] Correa, J., Borrero, A., Alpha, M., González, R., Curbelo, M. and Díaz, A. Design and implementation of a planning process for energy according to NTC-ISO 50001:2011, *Ingeniería Energética*, 35(1), pp. 38-47, 2014.
- [19] Xu, W. and Cao, L., Energy efficiency analysis of machine tools with periodic maintenance, *International Journal Production Research*, 52(18), pp. 5273-5285, 2014. DOI: 10.1080/00207543.2014.893067
- [20] Mujica, H. y Espinosa-Pérez, G., Control no lineal basado en pasividad de motores de inducción para alto desempeño dinámico, *Rev Iberoam. Automática e Informática Ind.*, 11, pp. 32-43, 2014. DOI: 10.1016/j.riai.2013.08.001
- [21] Jovanović, B. and Filipović, J., ISO 50001 standard-based energy management maturity model - proposal and validation in industry, *Journal of Cleaner Production*, 112, pp. 2744-2755, 2016. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.10.023
- [22] Spiering, T., Kohlitz, S., Sundmaeker, H. and Herrmann, C., Energy efficiency benchmarking for injection moulding processes, *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, 36, pp. 45-59, 2015. DOI: 10.1016/j.rcim.2014.12.010.
- [23] Energy audits - Requirements with guidance for use, ISO 50002, 2014.
- [24] Ministerio de Minas y Energía, Guía didáctica para el desarrollo de auditorías energéticas, Unidad de Planeación Minero Energética - UPME, Ministerio de Minas y Energía, República de Colombia, 2007.
- [25] Barrera, J., Ramírez, N., Garcia-Nunez, J.A. y Guevara, F., Diagnóstico del desempeño en consumo de energía eléctrica en plantas de beneficio en Colombia. *Palmas*, 37(4), pp 17-31, 2016.
- [26] García-Fajardo, M.I., Guía de estudio del potencial de ahorro eléctrico, *Revista Gerencia Tecnológica Informática*, 15(42), pp. 53-67, 2016.
- [27] Caicedo, J.M. y Tobar, V., Modelo de estudio y análisis de la eficiencia energética para el sector industrial en Colombia, aplicado a un caso de estudio en una empresa del sector del plástico, Tesis de grado, FIET, Dept. Elect. y Tel., Universidad del Cauca., Popayán, Colombia. 2016.
- [28] Batch Control, Part 1: Models and Terminology, ISA-88.01-1995. 2006.
- [29] Enterprise-Control System Integration, Part 3: Models of Manufacturing Operations Management, ISA 95.00.03. 2004.
- [30] Reglamento técnico de instalaciones eléctricas (RETIE), Ministerio de Minas y Energías, República de Colombia, 2013.
- [31] Dranetz, DRANETZ HDPQ User Guide, [online]. New Jersey, USA, 2015. Available at: www.dranetz.com
- [32] Reglamento técnico de iluminación y alumbrado público (RETILAP), Ministerio de Minas y Energía, República de Colombia, 2010.

M.I. García-Fajardo, es Ing. en Automática Industrial y MSc. en Automática de la Universidad del Cauca, Colombia, sus áreas de investigación son: eficiencia energética y energías renovables. Ha colaborado en diversos proyectos de investigación. En 2017 ha realizado una estancia de investigación en el Instituto de Ingeniería Energética de la Universidad Politécnica de Valencia, en Valencia, España.
ORCID: 0000-0001-6371-6899

J.M. Caicedo-Cuchimba, es Ing en Electrónica y Telecomunicaciones en 2017, de la Universidad del Cauca, Colombia. Se desempeña como líder de implementación en Ingetel S.A.S., contratista de Nokia y Ericsson. Sus áreas de interés son: radiocomunicaciones móviles, desarrollo web, eficiencia energética, electrónica e implementación de tecnologías 2G, 3G, 4G y 5G.
ORCID: 0000-0001-5970-9979

V. Tobar-Escobar, es Ing. en Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad del Cauca, Colombia y Tecnólogo en Sistemas de Información. Es ingeniero de soporte técnico y comercial en el Departamento de Smart Grid en GERS, donde lidera y asesora a las empresas e industrias en temas de automatización de subestaciones y calidad de potencia a través de la tecnología Dranetz y otras tecnologías de mantenimiento de subestaciones. Tiene experiencia en automatización de procesos industriales principalmente en procesos de inyección y solapado de polímeros de la industria del plástico.
ORCID: 0000-0002-9115-9337

J.M. Flórez-Marulanda, es Ing. en Electrónica y Telecomunicaciones en 1997, Esp. en Informática Industrial en 1999, Esp. en Redes y Servicios Telemáticos en 1999 y MSc. en Ingeniería, énfasis en Electrónica y Telecomunicaciones en 2010 de la Universidad del Cauca, Colombia. Se desempeña como docente de Planta e investigador en la Universidad del Cauca, Colombia. Sus áreas de interés son: robótica, control, robótica móvil, lógica difusa, redes neuronales, instrumentación industrial, control automático de procesos e integración empresarial.
ORCID: 0000-0003-1646-4419