

**MÉTODO DE AUDITORÍA ENERGÉTICA PARA MOTORES ELÉCTRICOS
ACORDE A ISO 50002:2014. CASO DE ESTUDIO.**



**JHONNY ALEJANDRO MUÑOZ NARVÁEZ
SIXTO ALBERTO OROBIO MOSQUERA**

**Universidad del Cauca
Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Departamento de Electrónica, Instrumentación y Control
Línea de Automatización y Control
Popayán, mayo de 2019**

**MÉTODO DE AUDITORÍA ENERGÉTICA PARA MOTORES ELÉCTRICOS
ACORDE A ISO 50002:2014. CASO DE ESTUDIO.**



**JHONNY ALEJANDRO MUÑOZ NARVÁEZ
SIXTO ALBERTO OROBIO MOSQUERA**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de
INGENIERO EN AUTOMATICA INDUSTRIAL**

Director: Mg. JUAN FERNANDO FLÓREZ MARULANDA

**Universidad del Cauca
Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Departamento de Electrónica, Instrumentación y Control
Línea de Automatización y Control
Popayán, mayo de 2019**

TABLA DE CONTENIDO

| | |
|---|----|
| LISTA DE TABLAS | 4 |
| LISTA DE FIGURAS..... | 5 |
| LISTA DE ACRÓNIMOS..... | 8 |
| CAPÍTULO 1 | 1 |
| 1. GENERALIDADES | 1 |
| 1.1. Panorama energético en la industria a nivel mundial | 1 |
| 1.1.1. Panorama energético en la industria colombiana | 3 |
| 1.1.3. Consumo energético de motores eléctricos en la industria nacional.... | 6 |
| 1.1.4. Eficiencia energética | 7 |
| 1.1.4.1 ¿Qué es? | 7 |
| 1.1.4.2. Eficiencia energética a nivel mundial | 9 |
| 1.1.4.3. Normatividad..... | 9 |
| 1.2. Auditoría energética..... | 10 |
| 1.2.1. Normatividad..... | 11 |
| 1.2.2. Auditorías energéticas en la industria | 12 |
| 1.2.3. Tipos de auditorías energéticas | 13 |
| 1.2.4. Auditoría energética eléctrica..... | 14 |
| CAPITULO 2..... | 16 |
| 2. DISEÑO DEL MÉTODO DE AUDITORÍA ENERGÉTICA PARA MOTORES ELÉCTRICOS ACORDE A ISO 50002:2014 (MAEM) | 16 |
| 2.1. ISO 50002:2014 Auditoría Energética | 16 |
| 2.2. Revisión sistemática de literatura sobre procesos de auditoría energética en la industria. | 17 |
| 2.2.1. Selección de documentación referente a ejecución de auditorías energéticas en entornos industriales..... | 17 |
| 2.2.2. Artículos que ejecutan procesos de auditorías energéticas..... | 17 |
| 2.2.3. Documentación adicional para desarrollar auditorías energéticas.. | 19 |
| 2.3. Naturaleza del método de auditoria eléctrica para motores eléctricos (MAEM) | 20 |
| 2.3.1. Estructuración de las etapas del MAEM | 20 |

| | |
|---|----|
| CAPÍTULO 3..... | 31 |
| 3. HERRAMIENTA TIC PARA LA RECOLECCION DE DATOS..... | 31 |
| • Recolección de Información para la auditoría..... | 32 |
| 3.1. ETAPA 1: Planificación de la auditoría energética | 33 |
| 3.1.1. Ejecución de la subetapa A.1 numeral 05..... | 33 |
| 3.2. ETAPA 2: Reunión de apertura | 34 |
| 3.2.1. Ejecución de la subetapa A.2 numeral 01..... | 34 |
| 3.2.2. Ejecución de la subetapa B.2 numeral 03..... | 35 |
| 3.3. ETAPA 3: Recopilación de datos..... | 37 |
| 3.3.1. Ejecución de la subetapa A.3..... | 37 |
| • Modelo físico de ISA S88.01 | 38 |
| 3.3.2. Ejecución de la subetapa C.3 numeral 02..... | 40 |
| 3.3.3. Ejecución de la subetapa G.3 | 40 |
| 3.4. ETAPA 5.1: Gestión del trabajo de campo | 41 |
| 3.4.1. Ejecución de la subetapa B.5.1..... | 41 |
| 3.4.1.1. Tiempos de producción | 42 |
| 3.4.1.2. Estimaciones del consumo energético mensual en los motores. | 42 |
| 3.5. ETAPA 5.2: Visita al sitio..... | 43 |
| 3.5.1. Ejecución de la Subetapa A5.2..... | 43 |
| 3.5.1.1. Medida de variables eléctricas, físicas y mecánicas | 43 |
| 3.5.1.2. Estimación de la eficiencia del motor según IEEE 112-B | 44 |
| CAPITULO 4..... | 51 |
| 4. APLICACIÓN DEL MAEM..... | 51 |
| 4.1. PREDIAGNÓSTICO DEL MAEM | 51 |
| 4.1.1. Visita al sitio | 51 |
| 4.1.2. Levantamiento de información | 54 |
| 4.1.3. Recopilación de facturas de consumo energético..... | 55 |
| 4.2. PROCESO DE DIAGNOSTICO DEL MAEM | 57 |
| 4.2.1. Toma de datos del sistema de transmisión en las plantas de clasificación y conversión de giro y frecuencia | 57 |

| | |
|---|----|
| 4.2.1.1. Planta de clasificación | 57 |
| 4.2.2. Toma de datos en el sistema motor simple de las plantas de clasificación y conversión de giro y frecuencia | 62 |
| 4.2.3. Toma de datos en el sistema de control de velocidad de las plantas de clasificación y conversión de giro y frecuencia..... | 75 |
| 4.2.3.1. Sistema de control de velocidad planta de clasificación | 75 |
| 4.2.3.2. Sistema de control de velocidad de planta de variación de giro y de frecuencia | 75 |
| 4.3. OPORTUNIDADES DE MEJORA EN LOS SISTEMAS AUDITADOS .. | 76 |
| 4.3.1. Planta de clasificación | 77 |
| 4.3.1.1. Oportunidades de mejora en el sistema de transmisión | 77 |
| 4.3.1.2. Oportunidades de mejora en el sistema motor simple..... | 78 |
| 4.3.2. Planta de conversión de giro y frecuencia | 82 |
| 4.3.2.1. Oportunidades de mejora en el sistema de transmisión | 82 |
| 4.3.2.2. Oportunidades de mejora en el sistema eléctrico..... | 82 |
| 4.4. EVALUACIÓN DE OPORTUNIDADES DE MEJORA. | 83 |
| CAPITULO 5 | 87 |
| 5. Conclusiones y trabajos futuros | 87 |
| 5.1. Conclusiones..... | 87 |
| 5.2. Trabajos futuros..... | 88 |

LISTA DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1.1: Consumo de electricidad de EDMS por sector..... | 5 |
| Tabla 2.1: Elección de artículos del proceso de revisión sistemática..... | 17 |
| Tabla 2.2: Documentación técnica para llevar a cabo auditorías energéticas..... | 19 |
| Tabla 2.3: Rangos de voltaje de sistema aceptables | 25 |
| Tabla 3.1: Herramientas de recopilación de datos para las etapas, subetapas y numerales del MAEM..... | 31 |
| Tabla 4.1: Velocidades máximas de la caja reductora | 59 |
| Tabla 4.2: Formato de registro para potenciales de ahorro de energía..... | 83 |
| Tabla 4.3: Características de evaluación económica en las maquinas A y B..... | 85 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1.1: Consumo final total por sector a nivel mundial. | 2 |
| Figura 1.2: Distribución de Consumo de Energía Final. Colombia - 2015. | 3 |
| Figura 1.3: Consumo de energía en el sector industrial por energético – 2014. | 4 |
| Figura 1.4: Participación de los usos de la energía eléctrica en la industria. | 4 |
| Figura 2.1: Diagrama de flujo del proceso de auditoría energética según ISO 50002. | 16 |
| Figura 3.1: Herramienta para la recolección de información inicial. | 32 |
| Figura 3.2: Encuesta sobre documentación de diagramación de la organización. | 33 |
| Figura 3.3: Notas a la encuesta sobre la documentación en la organización. | 34 |
| Figura 3.4: Identificación del personal asociado a la auditoría energética. | 34 |
| Figura 3.5: Recolección de datos de instrumentación necesaria en la auditoría. | 35 |
| Figura 3.6: Formatos de características de la instrumentación en la auditoría. | 36 |
| Figura 3.7: Resumen de los formatos de recolección de información inicial. | 37 |
| Figura 3.8: Resumen a las características de instrumentación identificadas para la auditoría. | 37 |
| Figura 3.9: Levantamiento del modelo físico de ISA S88 en formato digital. | 39 |
| Figura 3.10: Modelo físico según ISA S88 en formato digital. | 40 |
| Figura 3.11: Censo de carga en formato digital. | 40 |
| Figura 3.12: Consumos históricos de energía eléctrica activa y reactiva. | 41 |
| Figura 3.13: Censo de tiempos de producción en un proceso. | 42 |
| Figura 3.14: Censo de carga en campo de los sistemas impulsados por motor. | 43 |
| Figura 3.15: Medida de variables eléctricas, mecánicas y físicas. | 44 |
| Figura 3.16: Plantilla para la recolección de datos de placa. | 45 |
| Figura 3.17: Plantilla para la recolección de datos de resistencia al frío y temperatura. | 45 |
| Figura 3.18: Plantilla para introducir datos de la prueba de temperatura a carga nominal. | 46 |
| Figura 3.19: Plantilla de recolección de datos de prueba bajo carga. | 46 |
| Figura 3.20: Plantilla para datos de prueba sin carga. | 47 |
| Figura 3.21: Plantilla para datos de corrección de dinamómetro. | 48 |
| Figura 3.22: Datos de Eficiencia en Excel. | 48 |
| Figura 3.23: Plantilla para datos de pérdida de núcleo. | 49 |
| Figura 3.24: Plantilla de datos de suavizado de pérdida de carga dispersa. | 49 |
| Figura 3.25: Hoja de cálculo de las pérdidas del motor. | 50 |
| Figura 4.1: Formulario de recolección de información de la organización auditada. | 53 |
| Figura 4.2: Instrumentación encontrada para realizar las medidas. | 54 |
| Figura 4.3: Censo de carga con valores de placa de los equipos que conforman el EMDS de las plantas auditadas. | 55 |

| | |
|--|----|
| Figura 4.4: Consumo de energía activa en Tulcán del año 2018..... | 56 |
| Figura 4.5: Consumo de energía reactiva en Tulcán del año 2018..... | 56 |
| Figura 4.6: Sistema de proceso planta de clasificación | 58 |
| Figura 4.7: Sistema de transmisión por correa del EMDS de la planta clasificadora. | 58 |
| Figura 4.8: Relación entre diámetros del juego de poleas del motor y caja reductora | 59 |
| Figura 4.9: Sistemas de engranajes conectados a los ejes de los rodillos. | 59 |
| Figura 4.10: Reductor encargado de la disminución de velocidad en el sistema. . | 60 |
| Figura 4.11: chumaceras para facilitar el movimiento giratorio de los rodillos. | 60 |
| Figura 4.12: Sistema de proceso planta de conversión de giro y frecuencia. | 61 |
| Figura 4.13: Sistema de transmisión por correa de la planta de conversión de giro y frecuencia..... | 62 |
| Figura 4.14: Motor eléctrico que comanda el EMDS de la planta de clasificación. | 62 |
| Figura 4.15: Motor eléctrico del EMDS de la planta de conversión de giro y frecuencia. | 63 |
| Figura 4.16: Analizador de variables del motor in situ y de calidad eléctrica. | 64 |
| Figura 4.17: Censo de carga con valores de placa de los equipos que conforman el EMDS de las plantas auditadas | 65 |
| Figura 4.18: Figura descriptiva para la medición de voltaje de entrada al motor. . | 66 |
| Figura 4.19: Medición del voltaje de entrada al motor de inducción trifásico Baldor. | 66 |
| Figura 4.20: Valores de voltaje de línea medidos en el motor Baldor. | 67 |
| Figura 4.21: Figura descriptiva para la medición de la corriente de entrada al motor. | 67 |
| Figura 4.22: Medición de corriente de entrada al motor Baldor. | 68 |
| Figura 4.23: Valores de corriente de línea medidos a la entrada del motor Baldor. | 68 |
| Figura 4.24: Calculo del valor del factor de potencia del motor Baldor | 69 |
| Figura 4.25: Calculo de temperatura del motor funcionamiento nominal | 70 |
| Figura 4.26: Medidor de revoluciones por minuto acoplado al eje del motor | 70 |
| Figura 4.27: Valores de temperatura en grados Celsius y RPM del motor en condiciones nominales..... | 71 |
| Figura 4.28: Censo de carga con valores de placa de los equipos que conforman el EMDS de las plantas auditadas | 71 |
| Figura 4.29: Medidores de voltaje y corriente suministrada al motor. | 72 |
| Figura 4.30: Vatímetro que mide la potencia real de suministro al motor. | 72 |
| Figura 4.31: Calculo del factor de potencia..... | 73 |
| Figura 4.32: Medición de temperatura de los devanados del motor | 74 |
| Figura 4.33: Medición de las RPM del motor en condiciones nominales | 74 |

Figura 4.34: VFD que controla la velocidad de giro del motor Baldor75
Figura 4.35: VFD que controla la velocidad de giro del motor LabVolt76
Figura 4.36: Banco de condensadores en conexión delta80
Figura 4.37: Banco de condensadores en conexión estrella81

LISTA DE ACRÓNIMOS

| | |
|-------|--|
| AE | Auditoría Energética. |
| AENOR | Asociación Española de Normalización y Certificación. |
| ANSI | American National Standards Institute. |
| BECO | Balance Energético Colombiano. |
| CC | Corriente continua. |
| CEI | Centro de Evaluación Industrial. |
| CEN | Comité Europeo de Normalización. |
| CIIU | Clasificación Industrial Internacional Uniforme. |
| EE | Eficiencia Energética. |
| EIA | Administración de Información Energética de Estados Unidos. |
| EMDS | Sistema impulsado por motor eléctrico. |
| EPP | Energía Primaria Producida. |
| FP | Factor de Potencia. |
| IEA | Agencia Internacional de Energía. |
| IEC | Comisión Electrotécnica Internacional. |
| IEEE | Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica. |
| ISA | International Society of Automation. |
| ISO | Organización Internacional de Normalización. |
| JEC | Japan Electrotechnical Commission. |
| MAE | Método de Auditoría Energética. |
| Mtoe | Millones de toneladas equivalentes de petróleo. |
| NEMA | National Electrical Manufacturers Association. |
| OECD | Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos. |
| PFD | Diagrama de Flujo de Proceso. |
| PYME | Pequeñas y medianas empresas. |
| SEA | Agencia Sueca de Energía. |
| SEAP | Programa Sueco de Auditoría Energética. |
| SGE | Sistemas de Gestión de Energía. |
| TFC | Consumo Final Total. |
| TJ | Tera julio. |
| UAO | Universidad Autónoma de Occidente. |
| UPME | Unidad de Planeación Minero-Energética. |

CAPÍTULO 1

1. GENERALIDADES

El modelo actual de desarrollo basado en el consumo de energía no se puede mantener; es necesario implementar un nuevo modelo sostenible. El ahorro de energía y la mejora de la eficiencia energética son desafíos importantes que se deben afrontar en los próximos años. Por ello, y para mejorar la competitividad, se deben poner en marcha estrategias adecuadas y proporcionar las herramientas necesarias para introducir mejoras significativas en el avance tecnológico y en las pautas de consumo de energía. Los estudios sobre eficiencia energética y temas que están directamente relacionados con ésta han sido catalogados como asuntos de alto impacto mundial, ya que deben ser profundizados por la necesidad latente del planeta de reducir la explotación de los recursos naturales no renovables y reducir el impacto ambiental existente [1].

Implementar tecnologías, sistemas de vida y trabajo que ahorren energía, es importante para lograr un desarrollo sostenible que permita evolucionar hacia un modelo energético que fomente el ahorro y la eficiencia energética en todas las acciones de consumo. Una de las estrategias actualmente aplicadas es la de llevar a cabo la revisión del uso de energía en los procesos industriales, edificios de oficinas o residenciales, y en general en todo sitio que consuma energía; con el interés de disminuir y controlar los efectos negativos que se están presentando con la contaminación del medio ambiente, a raíz de las innumerables actividades que realizan dichos procesos. En los últimos años se ha observado a nivel mundial, un mayor compromiso en los diferentes sectores económicos, tomando medidas que trasladen a un desarrollo sostenible del consumo energético y la gestión ambiental, este cambio de mentalidad prevé una transformación a futuro en la estructura energética actual [1].

1.1. Panorama energético en la industria a nivel mundial

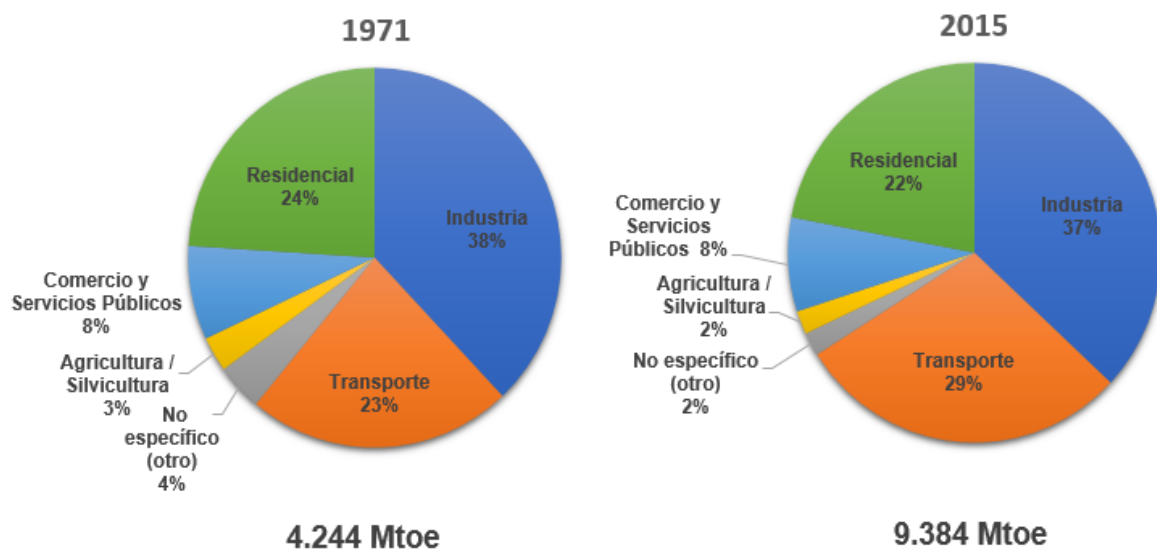
Desde que inicio la revolución industrial en la segunda mitad del siglo XVIII, hasta la actualidad, las sociedades han cambiado de forma drástica la manera de consumir energía. La revolución industrial marca el inicio del cambio de una estructura energética basada en biomasa, hacia otra que encuentra en el carbón su principal componente energético [2], [3]. Sin embargo, a principios del siglo XX el petróleo se hegemoniza como principal fuente energética a nivel mundial [4], [5].

Organismos como la IEA, creada por la OECD, y la EIA, fundada por el gobierno de los Estados Unidos; son entidades concebidas después de la crisis del petróleo de 1973, para coordinar las medidas necesarias que aseguraran el abastecimiento

de petróleo con el fin de que el crecimiento económico de los países no se viera afectado ante la falta de este recurso [6], [7]. Estas organizaciones desde la fecha de su creación se han dedicado a desarrollar un programa de recopilación de datos que cubre todo el espectro de fuentes de energía, usos finales y flujos de energía; generan a corto y largo plazo las previsiones energéticas nacionales e internacionales, y realizan análisis informativos sobre la energía y el consumo energético a nivel mundial en los países y regiones miembros y no - miembros de la OECD [5], [8], [9].

La IEA proporciona datos estadísticos del cambio en el consumo energético en los diferentes sectores económicos y tipos de combustibles, desde la crisis del petróleo de comienzos de la década del setenta [5],[10]. Además de una visión de los desarrollos energéticos basados en datos de oferta y demanda en 2015, para 150 países y diferentes regiones del mundo. Los informes de la IEA indican que entre 1971 y 2015, el consumo final total por sector (TFC) se duplicó (ver Figura 1.1). Sin embargo, el uso de energía en la mayoría de los sectores económicos no cambió. El transporte aumentó significativamente, del 23% de TFC en 1971 al 29% en 2015. Sin embargo, en 2015 la industria siguió siendo el mayor sector de consumo, solo un punto porcentual menos que en 1971 (37%) [6].

Figura 1.1: Consumo final total por sector a nivel mundial.



Fuente: Tomada de [6], febrero de 2019.

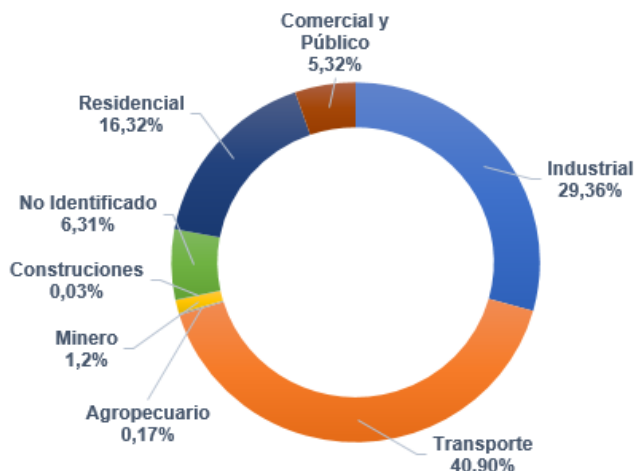
Por otro lado, la EIA desarrolló el caso de referencia, International Energy Outlook 2017 (IEO2017) [9]. En este caso el sector industrial mundial representa más de la mitad del consumo total de energía entregada hasta el 2040. Aunque el sector industrial es la sección de mayor consumo final de energía durante toda la proyección, no es el de mayor crecimiento. Se proyecta un crecimiento en los

sectores de edificios y transporte que supere el crecimiento del sector industrial progresivamente hasta 2040. En el IEO2017, se prevé que el consumo mundial de energía del sector industrial aumente en un promedio de 0,7% anual entre 2015 y 2040. La mayor parte del crecimiento a largo plazo se producirá en países que no pertenecen a la OCDE. De 2015 a 2040, el consumo de energía industrial en los países que no pertenecen a la OCDE crece en un promedio de 0,8% por año, en comparación con 0,2% por año en los países de la OECD [9].

1.1.1. Panorama energético en la industria colombiana

El Balance Energético Colombiano de 2016, contenido en el Plan de Acción Indicativo de Eficiencia Energética, presentado por la UPME, organismo adscrito al Ministerio de Minas y Energía [11]; especifica, que en el año 2015 el país consumió 1.219.827 TJ de energía final (ver Figura 1.2). Este consumo se concentra en tres sectores principalmente, el de transporte (40,2%), el industrial (28,9%) y el residencial (16,5%).

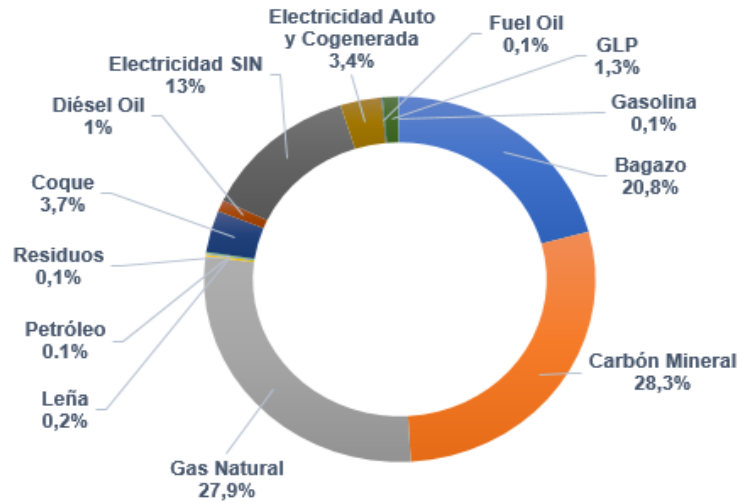
Figura 1.2: Distribución de Consumo de Energía Final. Colombia - 2015.



Fuente: Tomada de [11], febrero de 2019.

Dentro del consumo industrial, resalta la importancia que tienen los usos térmicos y asociados a ellos, energéticos como el carbón mineral, gas natural y bagazo, que representan el 83% del total de la energía consumida por la industria. El restante 17%, representa usos eléctricos, tanto con energía comprada (de la red) como con energía generada a través de sistemas de auto y cogeneración (ver Figura 1.3).

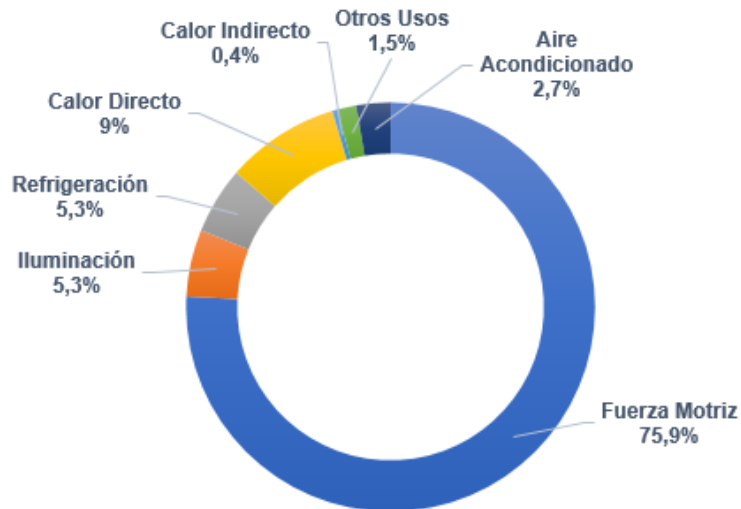
Figura 1.3: Consumo de energía en el sector industrial por energético – 2014.



Fuente: Tomada de [11], febrero de 2019.

La fuerza motriz es el principal uso de la energía eléctrica en la industria, esto incluye procesos de bombeo de agua, compresión de aire y otras aplicaciones indirectas de motorización eléctrica. También se encontró un amplio uso de la energía eléctrica para calor directo, concentrado principalmente en los sectores de metales básicos, plásticos y químicos; y de calor indirecto asociado a procesos de cogeneración (ver Figura 1.4).

Figura 1.4: Participación de los usos de la energía eléctrica en la industria.



Fuente: Tomada de [11], febrero de 2019.

1.1.2 Sistemas accionados por motor eléctrico (EMDS)

Los motores eléctricos y los sistemas impulsados por estos son el uso final de energía eléctrica más grande, se estima que los EMDS representan entre el 43% y el 46% de todo el consumo mundial de electricidad. La mayoría de los motores eléctricos en uso, consumen menos de 0,75 kW de potencia en una variedad de pequeñas aplicaciones, principalmente en los sectores residencial y comercial. Estos motores representan alrededor del 9% de todo el consumo eléctrico de los motores a nivel global. La mayor proporción de consumo de electricidad en motores es atribuible a motores de tamaño mediano con una potencia de entrada de 0,75 kW a 375 kW, estos pertenecen al nivel uno de tensión (motores que operan por debajo de 1Kv); los motores en el rango de tamaño medio se encuentran comúnmente en aplicaciones industriales, aunque también se usan en aplicaciones comerciales, transporte y agricultura, sistemas de infraestructura, y con menos frecuencia en el sector residencial (ver Tabla 1.1) [12].

Tabla 1.1: Consumo de electricidad de EDMS por sector

| Sector | Consumo de electricidad | % de toda la electricidad de EMDS | % del sector electricidad |
|--------------------------|--------------------------------|--|----------------------------------|
| Industrial | 4488 TWh/año | 64% | 69% |
| Comercial | 1412 TWh/año | 20% | 38% |
| Residencial | 948 TWh/año | 13% | 22% |
| Transporte y Agricultura | 260 TWh/año | 3% | 39% |

Fuente: Propia, febrero 2019.

Existen muchas tecnologías y diseños de motores disponibles, motores de corriente continua, imán permanente, reluctancia conmutada, paso a paso, servomotores, etc., sin embargo, los motores de inducción de corriente alternan asíncronos, son los más utilizados en la industria. Estos representan aproximadamente el 10% de todos los motores existentes y son el grupo de mayor consumo de energía. Se utilizan en bombas, ventiladores, compresores, transportadores y aplicaciones de procesamiento y manipulación industrial [12].

Un sistema accionado por motor típico consiste en diferentes combinaciones de maquinaria tales como bombas, ventiladores, compresores o sistemas de transporte (cargas mecánicas); acoplados a un motor eléctrico, ya sea directamente o a través de un dispositivo de transmisión; junto con un sistema de control de velocidad, generalmente comandado por un variador de frecuencia (VFD). En cada una de las aplicaciones mencionadas anteriormente, el motor eléctrico es solo una parte de todo el sistema electromecánico. La gran mayoría de la energía eléctrica utilizada por un EMSD es consumida por el propio motor eléctrico; solo se necesita una cantidad muy pequeña para activar las funciones de control u otros circuitos auxiliares. La cantidad de electricidad requerida por el motor para cumplir su función está determinada por el porcentaje de potencia mecánica demandada y la magnitud de las pérdidas que se producen en la entrega de esa potencia. Esas pérdidas se producen no solo dentro del propio motor sino también, y generalmente de manera más significativa, en el sistema mecánico que distribuye la energía desde el motor hasta la aplicación mecánica final [12],[14].

Un sistema accionado por motor eléctrico generalmente comprende tres capas de equipo:

- **Motor eléctrico:** un motor eléctrico que funciona completamente desde la red eléctrica.
- **Sistema de motor central:** el motor eléctrico, el sistema de transmisión o acople conectado desde el motor a la carga, y/o el sistema de transmisión de velocidad que utiliza.
- **Sistema de motor total:** el sistema de motor central más la eventual aplicación de energía (un sistema de tubería de calentamiento de agua, un sistema de conductos de ventilación de aire, un sistema de refrigeración con su red de agua fría y la torre de refrigeración, un sistema de tubería de aire comprimido y el almacenamiento). tanque, una instalación de cinta transportadora, un elevador para personas o bienes, etc.), así como equipos eléctricos entre la red y el motor (como la fuente de alimentación ininterrumpida, los transformadores, la compensación del factor de potencia, etc.) [12].

1.1.3. Consumo energético de motores eléctricos en la industria nacional

El sector industrial manufacturero colombiano, códigos 10 a 31 según la CIIU, está compuesto por cerca de 4.100 empresas, de acuerdo con el informe de 2014 del

Sistema de Información y Reporte Empresarial de la Superintendencia de Sociedades sobre empresas que pertenecen al sector real de la economía. Del 17% de la energía eléctrica consumida en los subsectores manufactureros de la CIIU, los sistemas de fuerza motriz constituyen el 76% de este consumo (ver Figura 1.4); factores como la antigüedad y carga de los equipos ayudan a que este porcentaje sea elevado. La caracterización realizada en las diferentes empresas determinó que el promedio de edades de los motores eléctricos ronda los 20 años, con casos extremos de motores con más de 50 años en funcionamiento. También se calculó que más de un 70% de los motores presenta factores de carga del 50% o menos [13].

Otro estudio realizado a 210 empresas pertenecientes a los subsectores manufactureros, códigos CIIU 10 a 18 en Colombia, determinó que, de la población de motores eléctricos encontrados el 98,5% de estos poseen potencias inferiores a 125 hp, siendo utilizado en mayor medida el motor eléctrico de corriente continua asíncrono. Estos motores son usados principalmente en movimiento mecánico, compresores, bombas y ventiladores; el estudio desarrollado encontró que los motores de los sectores muestreados presentan una alta obsolescencia tecnológica y sobredimensionamiento que conlleva a factores de potencia y carga bajos, y como consecuencia una baja eficiencia comparada con la que tendrían en caso de mejorar su dimensionamiento. La unión de todos estos elementos incide en un consumo de energía eléctrica considerable en las empresas sondeadas [13].

1.1.4. Eficiencia energética

El concepto de eficiencia energética (EE) surge como consecuencia de la crisis del petróleo y los altos costos de éste en los años 70, debido a ello, las organizaciones gubernamentales comenzaron a tomar en serio el tema de la gestión de la energía, ya que las acciones para establecer soluciones en cuanto a los costos, la disminución futura y la demanda creciente de los recursos energéticos no daban espera [15]. Por tal razón, se necesitaron plantear acciones para establecer nuevas fuentes de energía [6]. Por otro lado, el aumento progresivo de los consumos de energía y lo que esto representa en materia de costos y medioambiente, exigió el desarrollo de planes y medidas que disminuyeran dichos impactos y plantear estrategias para el buen uso y consumo de la energía [16].

1.1.4.1 ¿Qué es?

La Eficiencia energética es la *“Relación cuantitativa entre el resultado en términos de desempeño y la entrada de energía”* [17]. Esta, sirve de apoyo para la implementación de tecnologías, que conceden a las organizaciones buenos hábitos

de consumo para aumentar su productividad. La EE tiene como objetivo optimizar el manejo y uso de los recursos energéticos disponibles, esto es, reducir el consumo de energía sin afectar la producción y la calidad del producto, mediante la optimización de sus procesos productivos, empleando en estos el uso eficiente de la energía [18], permitiendo a las organizaciones ser más productivas y competitivas. *“En general, la eficiencia energética se refiere al uso de menos energía para producir la misma cantidad de servicios o resultados útiles”* [19].

En el sector industrial se establece que la EE puede medirse por la cantidad de energía necesaria para producir una cantidad de producto específica, además define la eficiencia energética por la siguiente razón:

$$EE = \frac{\text{Salida útil de un proceso}}{\text{Energía de entrada en un proceso}} \quad (1.1)$$

Para la búsqueda de la eficiencia energética en los sectores industriales [19], proponen adoptar una clasificación unificada a partir de cuatro sub-eficiencias en un sistema de energía:

1. Eficiencia tecnológica: medida de la conversión, el procesamiento y el uso de energía, evaluada principalmente por los siguientes indicadores: viabilidad, costo del ciclo de vida y retorno de la inversión. La eficiencia tecnológica se caracteriza por su novedad y capacidad.
2. Eficiencia de equipos: es una medida de la capacidad de producción y/o conversión de energía del equipo. Esta eficiencia se evalúa considerando los siguientes indicadores: capacidad, especificaciones y estándares, restricciones, y mantenimiento. El objetivo más importante de la eficiencia del equipo es minimizar las desviaciones de los parámetros reales del equipo a las especificaciones dadas.
3. Eficiencia de operación: es una medida de todo el sistema, y se evalúa considerando la coordinación adecuada de los diferentes componentes del sistema, dichos componentes suelen ser físicos, de tiempo y humanos. La eficiencia de operación tiene los siguientes indicadores: Indicadores de coordinación física (dimensionamiento y adaptación), coordinación de tiempo (control de tiempo) y coordinación Humana.
4. Eficiencia del rendimiento: es una medida que está determinada por indicadores externos del sistema, pero deterministas, como la producción, el

costo, las fuentes de energía, el impacto ambiental y los indicadores técnicos, entre otros. La eficiencia del rendimiento solo se puede mejorar cuando se realizan ciertas compensaciones entre los diferentes indicadores. Luego, la sostenibilidad del sistema de energía puede alcanzarse si los indicadores de ingeniería (por ejemplo, Fuentes, indicadores técnicos) no compiten con los indicadores socioeconómicos (Por ejemplo, Producción, costo, preocupaciones ambientales).

1.1.4.2. Eficiencia energética a nivel mundial

Los países con mayores consumos de energía en el mundo han lanzado políticas entorno al desarrollo de buenas prácticas para la gestión energética, con el fin de promover la optimización en el uso de ésta, así como el cuidado de las fuentes energéticas, y la implementación de energías renovables; dentro sus objetivos, están, reducir de manera significativa las emisiones de dióxido de carbono (CO₂), así como la demanda energética en cada uno de los sectores [20].

1.1.4.3. Normatividad

Alrededor del mundo existen normas establecidas como herramientas, que proporcionan buenas prácticas a las organizaciones para que puedan obtener una gestión adecuada de la energía en sus procesos. De estas se destacan:

- ISO 50001:2011. Norma internacional desarrollada por ISO. De gran utilidad para elaborar un sistema de gestión de energía (SGE), a partir del cual una organización puede desarrollar e implementar políticas energéticas y establecer objetivos, metas y planes de acción, para mejorar su desempeño energético, incluyendo la eficiencia energética, el uso y el consumo de energía [17].
- ISO 50002:2014. Esta norma es presentada como una herramienta que brinda apoyo a las organizaciones enfocadas en la implementación y monitoreo de un SGE. ISO 50002:2014 establece los principios y requisitos mínimos necesarios Para el proceso de desarrollo de auditorías energéticas (Ver Figura 1,5) en cualquier organización [21].
- La familia ISO 50000, presenta un conjunto de normas enfocadas a la gestión energética. La familia está compuesta por ISO 50001, ISO 50002, ISO 50003, ISO 50004, ISO 50006 e ISO 50015 [22].

- ANSI/MSE 2000:2008. Norma técnica estadounidense, que establece procedimientos necesarios para la administración proactiva de los recursos energéticos en una organización, incorporando la administración de energía en las operaciones y estrategias comerciales cotidianas. La norma abarca tanto la gestión como los elementos técnicos de la administración energética [23].
- UNE-EN ISO 50001: 2011. Es la versión española de la norma ISO 50001. Esta norma sustituyó a la norma UNE EN 16001:2010 [24].

1.2. Auditoria energética

El aumento progresivo del consumo, los costos y el agotamiento de los recursos energéticos, ha provocado que se planteen nuevas estrategias para realizar cambios que permitan optimizar el uso de la energía, obligando a las organizaciones a desarrollar programas de gestión de energía para satisfacer sus demandas energéticas, bajo la implementación de sistemas y procedimientos capaces de brindar oportunidades de ahorros sustanciales [25].

La auditoría energética es una herramienta para mejorar la eficiencia energética en las organizaciones; mediante este instrumento la inspección y el análisis del comportamiento de los flujos de energía a través de los procesos, logra cuantificar los consumos de energía en una instalación, permitiendo identificar en que sectores, procesos y equipos existen usos y consumos innecesarios, además esta herramienta permite evidenciar soluciones cuyo resultado disminuye el consumo de energía sin afectar la cantidad y calidad del producto. La auditoría energética presenta un enfoque sistemático (Ver Figura 1.5) que ayuda a la organización a descubrir en qué áreas existen desperfectos en términos de eficiencia energética y ofrece oportunidades de mejoras bajo soluciones pertinentes [26], por tal razón, la auditoria energética es entonces, una herramienta adecuada hacia la búsqueda de un programa de gestión de energía para cualquier tipo de organización.

Dentro de los beneficios que la auditoría energética entrega, se tienen: el ahorro del consumo de energía, la reducción de los costos económicos asociados a ese ahorro energético y el cumplimiento de normas ambientales debido a la disminución de emisiones tóxicas. Además, la auditoria brinda beneficios no energéticos ya que, al producirse mejoras en los procesos y equipos asociados, se presenta un aumento en el rendimiento del sistema general, lo que concluye en el aumento de la productividad de la organización [27].

1.2.1. Normatividad

A nivel internacional, existen organizaciones que establecen diferentes preceptos en cuanto a la mejora de la eficiencia energética en diferentes sectores, empresas, establecimientos, etc. Algunas de estas normas tienen como objetivo mantener y mejorar un SGE en una instalación o empresa, otras se enfocan en el diseño e implementación de auditorías energéticas para los mismos sectores; pero todas con el fin de lograr la mejora del desempeño energético. Las diferentes normas que existen entorno a lo antes mencionado son:

a) ISO 50001:2011. Norma internacional desarrollada por ISO. Propuesta para elaborar un sistema de gestión de energía, a partir del cual una organización puede desarrollar e implementar políticas energéticas y establecer objetivos, metas y planes de acción, para mejorar su desempeño energético, incluyendo la eficiencia energética, el uso y el consumo de energía [17].

b) ISO 50002:2014. Esta norma es presentada como una herramienta que brinda apoyo a las organizaciones enfocadas en la implementación y monitoreo de un SGE. ISO 50002:2014 establece los principios y requisitos mínimos necesarios para el proceso de desarrollo de auditorías energéticas en cualquier organización [21].

c) ISO 50003:2014. Está diseñada para ayudar a los organismos que ofrecen auditorías y certificaciones, proporcionándoles los requisitos para asegurar la competencia, la coherencia y la imparcialidad en el proceso de auditoría y certificación, con el fin de garantizar la eficacia de las auditorías en los SGE. ISO 50003:2014 aborda el proceso de auditoría, los requisitos de competencia del personal que participa en el proceso de certificación de sistemas de gestión de la energía y la duración de las auditorías [28].

d) ISO 50004:2014. proporciona orientación práctica y ejemplos para establecer, implementar, mantener y mejorar un SGE de acuerdo con el enfoque sistemático de ISO 50001. La guía en ISO 50004:2014 es aplicable a cualquier organización, independientemente de su tamaño, tipo, ubicación o nivel de madurez [29].

e) ISO 50015:2014. Establece principios y pautas generales para el proceso de medición y verificación del rendimiento energético de una organización o sus componentes. ISO 50015:2014 se puede utilizar de forma independiente o junto con otros estándares o protocolos, además de ser una norma aplicable a todos los tipos de energía [30].

f) UNE-EN 16247. Elaborada por el Comité Europeo de Normalización (CEN), es la versión en español de la norma EN 16247. Evolución natural de su antecesora UNE 216501 que tenía un carácter más generalista. La norma UNE-EN 16247 que anula la anterior, si bien tiene muchos puntos en común en cuanto a metodología supone un avance en la consideración de los distintos escenarios de aplicación, de forma que su estructura actual es la siguiente [31]:

- UNE-EN 16247-1:2012 Auditorías energéticas. Parte 1: Requisitos generales
- UNE-EN 16247-2:2014 Auditorías energéticas. Parte 2: Edificios.
- UNE-EN 16247-3:2014 Auditorías energéticas. Parte 3: Procesos.
- UNE-EN 16247-4:2014 Auditorías energéticas. Parte 4: Transporte.
- UNE-EN 16247-5:2015 Auditorías energéticas. Parte 5: Competencia de los auditores energéticos.

ISO 50001:2011 se destaca como una norma fundamental para brindar pautas para la elaboración de un SGE que busque la mejora de la eficiencia energética en una organización. ISO 50003:2014, ISO 50004:2014 e ISO 50015:2014; son reglamentaciones que brindan apoyo para implementar y mejorar un SGE y los procesos de auditoría energética. Sin embargo, las normas ISO 50002:2014 y UNE-EN 16247 estructuran atributos y requisitos para el diseño de una auditoría energética, siendo la norma ISO 50002:2014 más completa ya que fue creada como una herramienta para apoyar la implementación y monitoreo de un SGE; además establece principios y requerimientos necesarios para el proceso de desarrollo de auditorías energéticas en cualquier organización, de forma más detallada que su homóloga la UNE-EN 16247.

1.2.2. Auditorías energéticas en la industria

La implementación de una auditoría energética es un mecanismo óptimo, para aumentar la eficiencia energética de una empresa [25]-[36]. Si se tiene un conocimiento claro del consumo energético en la empresa, se pueden vislumbrar los factores que afectan este consumo de manera negativa, como también, las posibilidades técnicas y económicas que se deben desarrollar, para llevar a cabo medidas de ahorro que repercuta en una mejora de la eficiencia energética en el establecimiento.

1.2.3. Tipos de auditorías energéticas

Las auditorías energéticas pueden dividirse en dos categorías, teniendo en cuenta el tipo de sistemas y equipos auditados: 1) Auditorías de energía eléctrica: para equipos o sistemas que producen, convierten, transfieren, distribuyen o consumen energía eléctrica y 2) Auditorías de energía térmica: para equipos o sistemas que producen, convierten, transfieren, distribuyen o consumen energía térmica.

Como se dijo anteriormente, las auditorías energéticas se dividen teniendo en cuenta el tipo de sistemas y equipos auditados. Pueden ser de dos tipos, auditorías de energía eléctrica, para equipos o sistemas que producen, convierten, transfieren, distribuyen o consumen energía eléctrica y auditorías de energía térmica, para equipos o sistemas que producen, convierten, transfieren, distribuyen o consumen energía térmica.

El objetivo general de una auditoría energética, es la reducción del consumo energético de una organización, y que ello repercuta en la mejora de la eficiencia energética de esta; en un gran porcentaje, las auditorías energéticas son aplicadas en el sector industrial. Los tipos de auditoría energética se definen por factores como, el uso de los diferentes energéticos y/o por el alcance, nivel de profundidad o detalle que se requiere

Por su alcance, nivel de profundidad y detalle, según [54], [26], se dividen en:

- Auditoría Preliminar:

La auditoría preliminar, llamada alternativamente auditoría simple, auditoría de selección o auditoría de paso, es el tipo más simple y rápido de auditoría. Implica entrevistas con el personal operativo del sitio, revisión de las facturas de servicios públicos de la instalación y otros datos operativos, y un recorrido por la instalación para familiarizarse con la operación del edificio e identificar áreas evidentes de desperdicio o ineficiencia energética. En una auditoría energética preliminar, los datos disponibles se usan principalmente para un análisis simple del uso de energía y el rendimiento de la planta. Este tipo de auditoría no requiere mucha medición y recopilación de datos. Estas auditorías toman un tiempo relativamente corto y los resultados son más generales, proporcionando oportunidades comunes para la eficiencia energética. El análisis económico generalmente se limita al cálculo del período de recuperación simple, o el tiempo requerido para devolver la inversión de capital inicial a través de ahorros de energía realizados.

- Auditoría Detallada:

Denominada auditoría integral, auditoría de grado de inversión o maxi auditoría; es una evaluación cuantitativa del alcance de uso racional de la energía y tiene como objetivo derivar recomendaciones no solo teniendo en cuenta los datos disponibles, sino también realizando mediciones y pruebas instrumentadas de los principales subsistemas de consumo de energía.

Las auditorías energéticas integrales, requieren la realización de toma de mediciones y un inventario de datos; también se lleva a cabo la evaluación de uno o diferentes sistemas de energía (bomba, ventilador, aire comprimido, vapor, calefacción de proceso, etc.). Por lo tanto, el tiempo requerido para este tipo de auditoría es más largo que el de las auditorías preliminares. Los resultados de estas auditorías son más completos y útiles ya que brindan una imagen más precisa del rendimiento energético de la planta y recomendaciones más específicas para mejoras. El análisis económico realizado para las medidas de eficiencia recomendadas generalmente va más allá del período de recuperación simple y generalmente incluye otros cálculos económicos (tasa de rendimiento interna (TIR), valor presente neto (VPN), costo del ciclo de vida (CCV), etc.).

Para concluir, los procesos de auditoría mencionados anteriormente se puede desarrollar según el tipo o tipos de energético que implemente la organización. Se pueden llevar a cabo auditorías térmicas en sistemas o equipos que producen, convierten, transportan o distribuyen fluidos líquidos o gaseosos. Y auditorías eléctricas, las cuales se llevan a cabo sobre equipos o sistemas que producen, convierten, transfieren, distribuyen o consumen energía eléctrica [25].

1.2.4. Auditoría energética eléctrica.

En los procesos productivos dentro de una organización industrial, la energía eléctrica constituye una de las fuentes más utilizadas en el procesamiento y la transformación de los materiales [5], esto pasa, porque mucha de la equipación usada para tal fin, como son los sistemas impulsados por motores, transformadores, alumbrado y otros, demanda potencia eléctrica en su funcionamiento. Y debido a que estos sistemas presentan residuos energéticos al encontrarse en actividad [25], se torna necesario monitorear sus consumos, y de esta manera, observar cómo es el perfil de uso de energía en los procesos productivos de la organización.

La auditoría de energía eléctrica es un proceso sistemático para el diagnóstico y análisis del rendimiento energético de los sistemas, tras la medición del consumo en los equipos que se encuentran alimentados por la red eléctrica, lo que permite

vislumbrar si existe uso óptimo de la energía eléctrica en las instalaciones industriales. Con la auditoría eléctrica se pretende alcanzar el uso racional de energía mediante la implementación de estrategias de ahorro energético, bajo la instauración de soluciones que consigan reducir los desperdicios presentados ya sea por mal funcionamiento en los equipos o por la mala calidad del suministro eléctrico [1]. Uno de los beneficios más importantes de la auditoría eléctrica tras su desarrollo es que permite determinar grandes potenciales de ahorro dentro de la empresa.

Por último; en una planta industrial se pueden encontrar varios tipos de EMDS, cada uno de estos sistemas tiene características únicas y a menudo requieren diferentes técnicas e instrumentos de medición. Por tal razón, la auditoría energética implica una metodología y una serie de procedimientos bastante complejos a la hora de analizar un sistema determinado. En el caso particular del trabajo de grado realizado, el proceso de auditoría energética que se va a desarrollar concierne solamente a las dos primeras capas de un sistema impulsado por motor eléctrico (ver sección 1.1.2).

CAPITULO 2

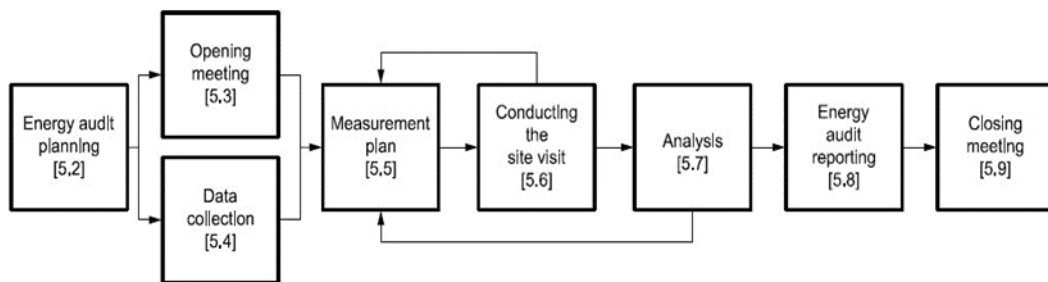
2. DISEÑO DEL MÉTODO DE AUDITORÍA ENERGÉTICA PARA MOTORES ELÉCTRICOS ACORDE A ISO 50002:2014 (MAEM)

2.1. ISO 50002:2014 Auditoría Energética

La norma ISO 50002 establece los requisitos del proceso de realización de una auditoría energética; es aplicable a todos los tipos de organizaciones, y a todas las formas de uso de la energía. El propósito de esta norma internacional es definir el conjunto mínimo de requisitos que conducen a la identificación de oportunidades de mejora de la eficiencia energética. La auditoría energética es un pilar fundamental ya que facilita el seguimiento, la medición y el análisis en un sistema de gestión de energía, como lo describe la norma ISO 50001 [24]. Esta norma también puede ser usada de manera independiente y permite diferenciar el enfoque de un proceso de auditoría energética en términos de alcance y cobertura, además de armonizar los aspectos comunes de las auditorías con el fin de mejorar la claridad y la transparencia de estas.

La norma ISO 50002 propone un proceso de auditoría energética, definido por las etapas de planificación de la auditoría energética, reunión de apertura, recolección de datos, plan de medición, realización de la visita al sitio, análisis, informe de auditoría y reunión de clausura (Figura 2.1).

Figura 2.1: Diagrama de flujo del proceso de auditoría energética según ISO 50002.



Fuente: Tomada de [21], enero de 2018.

El proceso de auditoría propuesto por ISO 50002, se exponen de manera detallada en el anexo A “Proceso de auditoría energética de la norma ISO 50002”.

2.2. Revisión sistemática de literatura sobre procesos de auditoría energética en la industria.

Como se mencionó al inicio de este capítulo, ISO 50002 establece los principios y requisitos necesarios para la implementación de auditorías energéticas en cualquier tipo de organización. La norma establece una serie de requerimientos para ejecutar un proceso de auditoría energética, pero no especifica como se debe desarrollar cada uno de dichos requerimientos al momento de encarar un proceso de auditoría en la práctica.

El presente trabajo, propone estructurar un método de auditoría energética para motores eléctricos acorde a ISO 50002:2014 denominado MAEM. Por tal razón, se realiza una revisión sistemática para saber cómo se efectúan los procesos de auditoría energética en la industria, particularmente en los sistemas impulsados por motores eléctricos. La información que arroje esta revisión (artículos, libros, guías etc.), se usa para desarrollar los requerimientos que establece la norma en cada una de sus etapas, subetapas y numerales.

2.2.1. Selección de documentación referente a ejecución de auditorías energéticas en entornos industriales

La selección de artículos que contengan información sobre el desarrollo de auditorías energéticas, implementadas en el sector industrial es el primer paso para la estructuración del MAEM. Esta escogencia requiere de una clasificación sistemática de información, asociada a documentos que contengan métodos, procedimientos, metodologías y técnicas, que efectúen procesos de auditorías energéticas en entornos industriales [37]. En el Anexo B” Revisión sistemática de artículos asociados a auditorías energéticas en la industria” se presenta el procedimiento detallado del proceso de clasificación sistemática.

2.2.2. Artículos que ejecutan procesos de auditorías energéticas

Una vez realizada la clasificación sistemática se eligieron doce (12) artículos, los cuales desarrollan métodos u otro tipo de técnica, para la realización de auditorías energéticas en entornos industriales (Tabla 2.1).

Tabla 2.1: Elección de artículos del proceso de revisión sistemática

| MÉTODOS | TITULO DEL ARTICULO |
|-----------------|--|
| Método 1 | Energy audits in industrial processes [25]. |
| Método 2 | A review on energy saving strategies in industrial sector [26]. |
| Método 3 | Energy efficiency opportunities in the production process of cast iron foundries: An experience in Italy [38]. |

| | |
|------------------|--|
| Método 4 | Energy consumption analysis of Spanish food and drink, textile, chemical and non-metallic mineral products sectors [39]. |
| Método 5 | Energy efficiency in small and medium enterprises: Lessons learned from 280 energy audits across Europe [40]. |
| Método 6 | Potentials for Reducing Primary Energy Consumption Through Energy Audit in the Packaging Paper Factory [41]. |
| Método 7 | Energy conservation potential of an energy audit within the pulp and paper industry in Morocco [42]. |
| Método 8 | A Multi Faceted Approach To Energy Conservation In Foundries [43]. |
| Método 9 | Application of energy value stream mapping as auditing tool for non-value added industrial energy management [44]. |
| Método 10 | Energy audit in textile industry: A study with ring frame motor [45]. |
| Método 11 | Energy conservation status in Taiwanese food industry [46]. |
| Método 12 | Energy Audit as a Tool for Improving Overall Energy Efficiency in Serbian Industrial Sector [47]. |

Fuente: Propia, marzo 2018.

La totalidad de los artículos define un método o especifica una serie de pasos sucesivos, para el desarrollo de una auditoria energética en un proceso industrial, algunos lo hacen de forma detallada y otros no tanto. M1, M7, M8, y M12 basan su estructura en normas técnicas y estándares; mientras que M2, M3, M4, M5, M6, M9, M10 y M11 detallan un método apoyándose en descripciones, definiciones, conceptos, de cómo realizar una auditoria energética, pero dando gran importancia al libre albedrío para su diseño y conformación.

Los métodos de auditoria energética M1, M4, y M5, son desarrollados en diferentes tipos de industria y procesos industriales, estos realizan un análisis energético del proceso y un estudio de los equipos involucrados en este. M2, M3, M6, M7, M8, M9, M10 Y M11 evalúan un tipo de industria en particular y realizan un análisis energético de los procesos y equipos implicados. En su generalidad los métodos se enfocan en realizar un diagnóstico energético a los equipos que componen los diferentes procesos industriales, planteando el uso de distintas herramientas técnicas para la reducción del consumo energético en ellos. Por otro lado, M1, M5 y M7 son los únicos métodos que proponen recomendaciones para la recolección de datos, durante la ejecución de la auditoria energética.

2.2.3. Documentación adicional para desarrollar auditorías energéticas.

Por otro lado, con el fin de enriquecer la revisión sistemática realizada en la sección anterior, se ejecutó una búsqueda de literatura adicional a través de bases de datos científicas y buscadores académicos (Science Research, Ciencia Science, Microsoft Academic, Google Scholar, BASE, Dialnet, SciELO, World Wide Science). El desarrollo de esta pesquisa arrojó un compendio de documentación heterogénea, dentro de la cual se encontraron libros, guías, estándares internacionales, artículos y trabajos de grado, ver Tabla 2.2.

Tabla 2.2: Documentación técnica para llevar a cabo auditorías energéticas.

| DOCUMENTO | TITULO DE DOCUMENTO |
|-----------|--|
| D1 | UNE-EN 16247-3. Auditorías energéticas parte 3: Procesos [48] |
| D2 | Procedimiento de auditorías energéticas en el sector industrial de la Comunidad de Madrid [49] |
| D3 | Modelo de Auditoria Energética en el Sector Industrial [50] |
| D4 | Energy Audit Guide for Motor Driven Systems [51] |
| D5 | Energy Management for Motor Driven Systems [52] |
| D6 | Auditoría eléctrica en fábrica de cartones nacionales CARTOPEL [53] |
| D7 | Industrial Energy Audit Guidebook: Guidelines for Conducting an Energy Audit in Industrial Facilities [54] |
| D8 | Comprehensive Energy Systems: 5.1 Energy Auditing [55] |
| D9 | Reference Manual for Motor Driven Systems [56] |
| D10 | Energy-Efficiency Policy Opportunities for Electric Motor-Driven Systems [12] |

Fuente: Propia, febrero 2019.

Dicha literatura propone métodos, procedimientos, metodologías o técnicas para implementar auditorías energéticas en la industria o en sistemas accionados por motores eléctricos en entornos industriales. El presente trabajo también se nutre de literatura concerniente a monografías que desarrollan los temas de estudio y análisis de la eficiencia energética en el sector industrial y la aplicación de la norma ISO 50002 en un caso de estudio; trabajos llevados a cabo en la Universidad del Cauca [57]-[59].

2.3. Naturaleza del método de auditoría eléctrica para motores eléctricos (MAEM)

Como se mencionó al inicio de este capítulo, ISO 50002:2014 establece los principios y requisitos necesarios para la implementación de auditorías energéticas en cualquier tipo de organización o establecimiento. La norma específica los requerimientos para ejecutar un proceso de auditoría energética, pero no indica cómo se deben llevar a cabo.

Debido a lo anterior, se configuró un método de auditoría energética para motores eléctricos de nivel uno de tensión, basado en la norma ISO 50002 y denominado MAEM. La estructuración del método se basa en un proceso de mapeo de los diferentes artículos seleccionados en la revisión sistemática y de la documentación adicional encontrada, con las diferentes etapas, subetapas y numerales descritas por la norma (ver Anexo Digital Mapeo).

2.3.1. Estructuración de las etapas del MAEM

Siguiendo con lo anterior, se debe dar cumplimiento a las diferentes etapas, subetapas y numerales definidos por la ISO 50002. Donde las subetapas se identifican con letras y el número asociado a la etapa que pertenece, y los numerales con números. El MAEM está conformado de la siguiente manera:

ETAPA 1: Planificación de la auditoría energética

La primera etapa está relacionada con las actividades de planificación de la auditoría, en donde se define alcance, límite y objetivos de esta, además de la recopilación de información preliminar. La planificación se estructura en lo siguiente:

A.1) Se define el ámbito de la auditoría energética a través de la concordancia entre auditor y organización, para dar cumplimiento a los siguientes numerales:

1) La organización debe decidir si la auditoría se llevará a cabo por un representante de la planta o si un consultor o grupo de consultores externos deben ser contratados para realizarla. Según [25] [41], el perfil profesional del auditor debe ser el de ingeniero o técnico industrial; con especialidades en sistemas eléctricos y/o mecánicos. O cualquier profesional con una carrera afín a las antes mencionadas, con dichos conceptos básicos.

2) Auditor y organización deben determinar alcance, límites y objetivos de la auditoría energética, como lo expone [54]:

- I. El alcance debe considerar la naturaleza del establecimiento, verificando los tipos de sistemas y procesos energéticos que desarrolla, además, de los equipos que utiliza. Para el MAEM, el alcance cubre los sistemas de motor eléctrico y central (ver sección 1.1.2), pertenecientes al nivel uno de tensión

(motores de tamaño mediano con una potencia de entrada de 0,75 kW a 375 kW). Para el resto de esta sección dichos sistemas se denominarán sistemas de motor específico.

- II. El límite de la auditoria se ciñe a la relación de consumo y rendimiento energético de los sistemas de motor específico, con los procesos productivos que desarrolla el establecimiento.
- III. Según el alcance establecido, los objetivos para el MAEM son:
 - ✓ Realizar un diagnóstico energético en los sistemas motorizados específicos.
 - ✓ Definir el potencial de eficiencia energética de los diferentes sistemas de motores eléctricos.
 - ✓ Identificar oportunidades de mejora de desempeño y ahorro energético en los sistemas motorizados.

3) El auditor y la organización definen el nivel de detalle de la auditoria: para el MAEM se define una auditoria preliminar y detallada (ver sección 1.2.3) [54].

4) El auditor debe realizar una visita al establecimiento, para conocer la naturaleza y complejidad del sitio, y determinar el período de tiempo necesario para completar la auditoria energética [51].

5) El auditor solicitara a la organización la información pertinente antes de comenzar el ejercicio de auditoria, tal y como lo explican [51], [25]. Esta información incluye:

- ✓ Documentación concerniente a los sistemas de motores específicos (planos eléctricos, manuales, hoja de datos de equipos, etc.).
- ✓ Copias y un resumen de las medidas y estudios completados de eficiencia energética anteriormente (si aplica).
- ✓ Documentación referente al consumo de energía eléctrica del sitio auditado (facturas de energía eléctrica de los últimos 2 a 3 años).

B.1) Se establece el contexto de la auditoria con base a [21]:

1) Evaluar los requisitos reglamentarios que posee la organización, y ver como estos afectan alcance, limite y objetivos establecidos.

2) Revisar los planes estratégicos que desarrolla la organización y valorar la influencia en el rendimiento energético de esta.

3) Examinar los sistemas de gestión (medioambiente, calidad, gestión de la energía u otros) que implementa la organización y determinar su incidencia en el proceso de ejecución de la auditoria.

C.1) El auditor de energía informará a la organización de [21]:

1) Instalaciones, equipos y servicios necesarios para llevar a cabo la auditoría energética, tales como, instrumentación para medir los parámetros relevantes en la toma de datos, personal profesional y técnico para desarrollar procedimientos en el sitio (instalación de equipos, mantenimiento, manipulación de la red de suministro eléctrica, etc.).

2) Cualquier conflicto de interés que afecte el desarrollo de la auditoría.

ETAPA 2: Reunión de apertura

La segunda etapa atañe al rol informativo del auditor para desarrollar el ámbito de la auditoría energética.

A.2) El auditor de energía debe requerir a la organización lo siguiente [51]:

1) Escogencia del personal pertinente (equipo de evaluación), para llevar a cabo alcance, límite y objetivos propuestos. Se debe elegir:

- ✓ El representante de la organización anfitriona, el cual posee la responsabilidad general y la propiedad de la evaluación.
- ✓ Personal encargado de los procesos productivos que involucren sistemas de motores específicos.
- ✓ Personal de mantenimiento de los sistemas eléctricos.
- ✓ Expertos para el análisis del sistema de motores eléctricos.

2) Una reunión de apertura para establecer funciones y responsabilidades, en la ejecución de la auditoría. El personal que deberá asistir incluye:

- ✓ Gerente de la empresa o representante.
- ✓ Director financiero o jefe de control.
- ✓ Jefe de personal
- ✓ Jefe de procesos.
- ✓ Equipo evaluativo y auditor.

B.2) El auditor deberá acordar con la organización sobre:

1) La accesibilidad que debe tener el equipo de evaluación en la organización. De acuerdo con [51], se debe tener acceso a:

- ✓ Las áreas donde se desarrollan los procesos energéticos y productivos de la planta.
- ✓ Personal de las instalaciones (ingeniería, operaciones, mantenimiento).
- ✓ Áreas donde se encuentran fuentes de información concernientes al sistema eléctrico, como planos, manuales, hoja de datos de equipos, registros de mantenimiento, informes de pruebas, información histórica de facturas de

energía eléctrica, datos de control, registros de calibración de instrumentación, etc.

2) La disponibilidad de la información y el método de recolección de datos que se utilizara [41]:

- ✓ El auditor energético debe revisar la información recopilada con respecto a su coherencia e idoneidad.
- ✓ Si los datos solicitados no están disponibles, el auditor energético debe definir el método para obtener la información necesaria (por ejemplo, mediciones, estimaciones, o modelización)

3) La naturaleza de la medición y el equipo de medida. Como indica [51], el auditor y el equipo de evaluación deben:

- ✓ Elegir el método de medición adecuado.
- ✓ Selección de la instrumentación de medición.
- ✓ Definir si se requieren equipos de medición especiales debido al entorno de trabajo (altas o bajas temperaturas, ruido eléctrico, polución por material, etc.).
- ✓ La precisión de medición requerida para el proceso de auditoría energética.

ETAPA 3: Recopilación de datos

Para la tercera etapa se establecen los datos que se deben recopilar, clasificar y registrar, según alcance, limite y objetivos establecidos. Esto incluye la siguiente información, según [51], [52]:

A.3) se deben identificar los sistemas, procesos y equipos consumidores de energía eléctrica. Para el MAEM el auditor y su equipo evaluarán los sistemas de motores específicos.

B.3) Se deben definir las características para la recopilación de datos según alcance, limite y objetivos definidos.

Para el MAEM se requiere:

- ✓ Recopilar los parámetros que den a conocer el consumo y el rendimiento energético de los sistemas accionados por motor.
- ✓ Recolectar variables que entreguen información del suministro de energía, en aras de conocer su calidad.

C.3) El auditor energético y su equipo evaluativo deben recopilar datos históricos y actuales, en aras de conocer el rendimiento energético de los sistemas motorizados. Además de que dicha información recolectada ayude a identificar oportunidades de

mejora y ahorro energético en estos sistemas; tal y como indican [54], [52], [41]. Se deben recopilar los siguientes datos:

1) Datos del sistema de transmisión o acoplamiento mecánico (tipos de acoples, correas de transmisión, engranajes, cadenas, piñones, etc.; utilizados en el sistema).

2) Datos del motor (información de placa, medición de variables eléctricas, mecánicas y físicas), en aras de conocer su consumo energético y eficiencia real.

Para este caso en particular, se recomiendan tres opciones para medir las variables eléctricas, mecánicas y físicas en los motores; esto con el objetivo de corroborar el funcionamiento adecuado del equipo.

Opción 1: La primera y más deseable de las opciones, establece obtener in situ los valores de dichas variables, sin tener que desacoplar el motor de su línea de producción, a través de un equipo analizador de calidad eléctrica y variables mecánicas [13].

Opción 2: La segunda opción, se basa en realizar pruebas en el motor para el cálculo de dichas variables, con el fin de obtener el valor de eficiencia de este, utilizando un banco de ensayos equipado con la instrumentación necesaria para ello. Y particularmente que permita hacerlo aplicando el estándar IEEE 112-B.

Opción 3: Por último, la tercera opción consiste en desarrollar un plan de medición (ver Capítulo 4, Etapa 4); para la toma de datos de las diferentes variables anteriormente mencionadas, a través de diferentes instrumentos de medición (amperímetros, vatímetros, tacómetro, etc.). Esto con el objetivo de conocer si el funcionamiento del motor es eficiente y analizar oportunidades de mejora en este.

3) Datos de la potencia eléctrica suministrada al EMDS y de la energía eléctrica entregada por el sistema de velocidad (distorsión armónica, factor de potencia, desbalance de tensiones, etc.). Con el objetivo de conocer la calidad del suministro energético y poder encontrar oportunidades de mejora.

D.3) La instrumentación necesaria para llevar a cabo la recopilación de datos del sistema motor, tal y como se expuso en la subetapa anterior incluye:

1) Opción 1: Equipo analizador de calidad eléctrica y variables mecánicas [60].

2) Opción 2: Banco de pruebas.

3) Opción 3: Amperímetros, voltímetro, vatímetro, multímetro, contadores de energía eléctrica, analizadores de redes eléctricas, termopares y termómetros infrarrojos, tacómetro,

E.3) El auditor debe solicitar información de planes futuros que puedan afectar el rendimiento energético [21].

- ✓ Expansiones planificadas, contracciones o cambios en los procesos productivos y energéticos que involucren el sistema de motores específicos.
- ✓ Cambios planeados o reemplazos en el sistema eléctrico y motores eléctricos que tengan implicaciones significativas en la estructura de consumo energético.

F.3) El auditor debe estar al tanto de procesos de auditoría energética o estudios previos desarrollados anteriormente [21].

G.3) Se debe identificar el consumo de energía de la red eléctrica y los sistemas accionados por motor. Según [52] se debe realizar:

- ✓ Análisis de las facturas de energía eléctrica de los últimos 2 o 3 años, para entender la estructura energética de consumo energético del sitio auditado.
- ✓ Censo de carga de los equipos pertenecientes al sistema de motores específicos para determinar su consumo energético.

H.3) El auditor debe tener en claro la condición del sistema de distribución eléctrica de la planta. Tal y como indica [52].

Los valores de entrega de voltaje de aceptables en el sistema de distribución en planta, según lo definen las normas IEEE 1547-2018 y ANSI C84.1-2016, se resumen en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3: Rangos de voltaje de sistema aceptables

| Voltaje nominal del sistema | Límites permitidos% | Rango de voltaje permitido |
|------------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|
| 120V (L - N) | ± 5% | 114V - 126V |
| 240V (L - L) | ± 5% | 228V - 252V |
| 480V (L - L) | ± 5% | 456V - 504V |

Fuente: Propia, febrero 2019.

Cuando el promedio de los voltajes trifásicos excede los rangos de valores de la Tabla 2.3, el sistema está fuera de cumplimiento. No se deben realizar mediciones o análisis de campo hasta que el sistema se ponga en conformidad.

ETAPA 4: Plan de medición

Se establece el plan de medición, el cual determinara los pasos o acciones necesarias para llevar a cabo la etapa de recopilación de datos. Los principales elementos que se incluirán en el plan de medición son:

A.4) Auditor y equipo evaluativo deben definir, según su idoneidad y criterio los puntos de medición en los sistemas de motores específicos, además de la

instrumentación necesaria para la recopilación de datos, teniendo en cuenta la naturaleza del sitio auditado.

B.4) El equipo evaluativo debe definir, según la naturaleza del sistema auditado, el número de veces que es necesario llevar a cabo las mediciones, para obtener datos precisos. Además, se debe tener en cuenta la incertidumbre asociada al instrumento de medida [51].

C.4) La duración de medida se debe llevar a cabo según las especificaciones del equipo de medida y durante el período de tiempo que este establezca para obtener el valor de la variable de manera correcta [21].

D.4) Auditor y equipo evaluativo establecen la frecuencia de adquisición para cada medición basándose en la naturaleza y complejidad del sitio. Dependiendo de los procesos energéticos realizados por el establecimiento, la medición se realiza de manera instantánea o puede requerir un período de medición de horas, días o semanas [51].

E.4) Las mediciones deben ser llevadas a cabo por el personal de mantenimiento de los sistemas eléctricos y expertos para el análisis de los sistemas de motores específicos; los cuales hacen parte del equipo evaluativo. El auditor y el resto del equipo deben estar supervisando el proceso de medición. [51].

F.4) El equipo de medición debe estar calibrado antes de su uso, de lo contrario se tiene que registrar el procedimiento o norma utilizado para la calibración.

ETAPA 5: Realización de la visita

ETAPA 5.1: Gestión del trabajo de campo

Al realizar la visita de campo el auditor y su equipo deberán:

A.5.1) Observar los usos de energía eléctrica y los sistemas específicos dentro de la organización para vislumbrar oportunidades de mejora del rendimiento energético.

B.5.1) Documentar las condiciones de operación actuales del sistema accionado por motor y las rutinas del operario; para diagnosticar el impacto que tienen en el rendimiento energético [21].

ETAPA 5.2 Visita al sitio

Durante esta fase el equipo evaluativo debe ejecutar el plan de medición definido en la etapa 4. Se debe realizar lo siguiente:

A.5.2) Auditor y equipo evaluativo llevaran a cabo operaciones directas en los EMDS. Las mediciones deben ser llevadas a cabo por el personal de mantenimiento

de los sistemas eléctricos y expertos en el análisis de los sistemas de motores específicos, tal y como lo indican los numerales y subetapas del plan de medición establecido. Además, dicho personal debe ser el encargado de manipular la instrumentación para recopilar los datos necesarios.

B.5.2) Si es necesario, el equipo evaluativo deberá solicitar a la organización cualquier tipo de información o documentación relevante que surja de la visita de campo realizada.

ETAPA 6: Análisis

ETAPA 6.1: General

Para el análisis de la información recolectada el auditor y su equipo deberán [41]:

A.6.1) Utilizar métodos de cálculo apropiados para el análisis de los datos recogidos. En particular para el MAEM, se desarrollaron diferentes herramientas digitales, que permiten llevar a cabo dichos cálculos.

B.6.1) El auditor y su equipo deberán documentar los métodos utilizados y cualquier suposición o estimación realizada [21].

C.6.1) El equipo auditor debe cerciorarse de que las variables que afectan la incertidumbre de la medición de parámetros y su contribución a los resultados sean tenidas en cuenta durante el análisis [21].

ETAPA 6.2: Análisis del rendimiento energético actual

El equipo evaluativo debe calcular el rendimiento actual de los usos energéticos dentro del alcance, limite y objetivos definidos; de la siguiente manera [51], [54], [12]:

A.6.2) Realizar un desglose del consumo de energía, a través de un balance energético del cálculo de la potencia eléctrica consumida por los equipos pertenecientes al sistema accionado por motor, a través de un censo de carga.

B.6.2) El equipo evaluativo debe generar un patrón histórico del rendimiento energético del sistema auditado a través de un análisis de las facturas de energía eléctrica, para entender la estructura de consumo energético del lugar.

ETAPA 6.3: Identificación de oportunidades de mejora

Según la naturaleza del establecimiento auditado se deben:

A.6.3) Proponer oportunidades de mejora de la eficiencia energética en los EMDS entorno a los siguientes ítems, según [12], [41], [56]:

- ✓ Mejoras para la calidad del suministro energético del sistema.

- ✓ Mejoras en el rendimiento energético del motor:
- ✓ Mejoras para el sistema de velocidad:
- ✓ Mejoras en el sistema de transmisión o acople mecánico.

B.6.3) El equipo auditor debe identificar oportunidades de mejora sobre la base de antigüedad, condición de funcionamiento y mantenimiento del equipo, teniendo en cuenta la viabilidad y el tiempo estimado de recuperación de la inversión. Estas incluyen:

- ✓ Sustitución de equipos por edad, trabajo prolongado y continuo, o cuando la opción de reparación no es viable por los altos costos que esto implica.
- ✓ Sustitución por antigüedad, es decir la tecnología utilizada no es la adecuada, y debido a esto reduce la productividad de los procesos y presenta bajas prestaciones
- ✓ Reemplazo de un equipo defectuoso por un motor de eficiencia estándar, alta o superior.
- ✓ Reemplazo por motores de velocidad variable que se adaptan a cargas cambiantes.

Mantenimiento:

- ✓ Controles mecánicos regulares (calidad del aceite para el desgaste, vibraciones para una mala alineación) y mantenimiento (cojinetes, ventilador, turbina, compresor, etc.).
- ✓ Controles eléctricos regulares (picos electrónicos, imagen térmica del motor) y mantenimiento (bobinas sobrecalentadas, fases desequilibradas, detección de desgaste y fallas en el sistema motor, etc.).
- ✓ Preparación para la falla del motor mediante la creación de un inventario de repuestos.
- ✓ Mejoras en las instalaciones eléctricas debido a problemas ocasionados por conexiones de mala calidad o que no cumplen la reglamentación, etc., (ejemplo: cálculo correcto del diámetro de conductores, protección de circuitos, mejoras en los esquemas de conexión a tierra).
- ✓ Mantenimiento (limpieza, aceitado, fijación, alineamiento, etc.) del equipo mecánico adaptado al motor (rueda de la bomba, turbina, compresor, etc.):

C.6.3) Se deben confrontar en un proceso de *benchmarking* la tecnología auditada, con los equipos que se encuentre a la vanguardia en el mercado; para proponer nuevas oportunidades de mejora.

D.6.3) El auditor debe implementar mejores prácticas, incluyendo controles operativos y comportamientos, basados en:

- ✓ Mejoramiento de los hábitos operativos (ejemplo: Incluir información técnica de protocolos, manuales, normas, estándares, etc., de la forma de realizar un proceso u operar una máquina).

ETAPA 6.4: Evaluación de oportunidades de mejora

A.6.4) El equipo auditor debe evaluar las mejoras operacionales y de ahorro energético desarrolladas en el establecimiento, al implementar las oportunidades de mejora de la etapa anterior [21].

B.6.4) El equipo auditor debe establecer los ahorros financieros previstos por las oportunidades de mejora planteadas. Se tienen que implementar diferentes métodos y análisis para encontrar el costo-beneficio de las oportunidades, tales como [12], [56]:

- ✓ Método del valor presente neto (VPN)
- ✓ Método de tasa interna de retorno (IRR)

Además de lo anterior, la evaluación financiera de las medidas de ahorro de energía incluye estimaciones del auditor de energía en función de su experiencia, teniendo en cuenta precios de equipos y tecnología, costos de instalación, repuestos, etc., en aras de conseguir una reducción del costo financiero.

C.6.4) Mantenimiento, calidad, productividad y medio ambiente son ganancias no energéticas relevantes para los sistemas impulsados por motor. Estas ganancias deben ser evaluadas, si es posible, cuantificadas por el equipo auditor junto con los representantes de la compañía.

ETAPA 7: Informes de auditoría energética.

ETAPA 7.1: General

Al informar los resultados de la auditoría energética, se deberá:

A.7.1) Garantizar que se hayan alcanzado los requisitos acordados con la organización en relación con la auditoría energética.

B.7.1) Especificar las mediciones realizadas durante la auditoría energética.

C.7.1) Si la base para el análisis fueron cálculos, simulaciones o estimaciones.

D.7.1) El auditor y su equipo deben:

- ✓ Describir el informe de auditoría proporcionando información adecuada a los lectores potenciales de este, como son gerente de planta, supervisor de ingeniería o mantenimiento, o supervisor de procesos.
- ✓ Escribir el informe de manera concisa y precisa, además de utilizar un lenguaje directo y fácil de entender.

- ✓ Usar gráficos (en mayor medida), tablas o imágenes, para la presentación de datos, resultados y tendencias.

E.7.1) El informe debe incluir las oportunidades de mejora del rendimiento energético identificadas e implementadas.

ETAPA 7.2: Contenido del informe de auditoría energética

El contenido del informe debe adecuarse al alcance, límite y objetivos establecidos.

A.7.2) Se debe detallar la información sobre la organización, según alcance, límites y objetivos establecidos. La conformación del equipo auditor y la descripción de cada una de las etapas desarrolladas en la auditoría energética.

B.7.2) El documento debe contener información sobre:

- ✓ La recopilación de datos:
- ✓ Plan de medición.
- ✓ El análisis efectuado.

D.7.2) Se deben incluir las oportunidades de mejora del rendimiento energético y los ahorros energéticos previstos:

E.7.2) Se deben escribir las conclusiones y recomendaciones del proceso de ejecución de la auditoría energética.

ETAPA 8: Reunión de cierre

En la reunión final, el auditor energético debe:

A.8) Presentar el informe final de la ejecución de la auditoría energética, para facilitar la toma de decisiones por parte de la organización.

B.8) El auditor y su equipo deben ser capaces de explicar los resultados de la auditoría y afrontar las preguntas formuladas por los representantes de la organización, con relación al ejercicio de auditoría desarrollado.

C.8) El equipo auditor y la organización deben identificar los elementos que requieren un análisis o seguimiento ulterior. Si procede, se requiere establecer un sistema de monitoreo para seguir y controlar el progreso de las acciones tomadas. Este sistema debe rastrear y medir el consumo de energía, las oportunidades de mejora del rendimiento implementadas y los ahorros energéticos conseguidos.

CAPÍTULO 3

3. HERRAMIENTA TIC PARA LA RECOLECCION DE DATOS

En este capítulo se presentan el diseño de un conjunto de formatos basados en hojas de cálculo electrónicas (Formatos de recolección), cuyo propósito es servir al auditor como herramienta de captura de datos al momento de ejecutar el proceso de auditoría, en particular el plan de medición. Los formatos están fundamentados en las etapas, subetapas y numerales del MAEM que requieren un levantamiento de información (ver Tabla 3.1). Todos los formatos mencionados en este capítulo se encuentran en el Anexo Digital “Formatos de recolección”.

Tabla 3.1: Herramientas de recopilación de datos para las etapas, subetapas y numerales del MAEM.

| ETAPA | SUBETAPA | NUMERAL | HERRAMIENTA |
|---|--|--|---|
| 1. Planificación de la auditoría energética | A.1. Se define el ámbito de la auditoría energética a través de la concordancia entre auditor y organización | 05. El auditor solicitará a la organización la información pertinente antes de comenzar el ejercicio de auditoría | E1.A1.05– INFORMACION GENERAL |
| 2. Reunión de apertura | A.2. El auditor de energía debe requerir a la organización | 01. Escogencia del personal pertinente (equipo de evaluación), para llevar a cabo alcance, límite y objetivos propuestos. | E2.A2.01 PERSONAL - |
| | B.2. El auditor deberá acordar con la organización | 03. La naturaleza de la medición y el equipo de medida | E2.B2:03- INSTRUMENTACION |
| 3. Recopilación de datos | A.3. se deben identificar los sistemas, procesos y equipos consumidores de energía eléctrica. Para el MAEM el auditor y su equipo evaluarán los sistemas de motores específicos | | E3.A.3 Modelo Físico ISA 88 |
| | C.3. El auditor energético y su equipo evaluativo deben recopilar datos históricos y actuales, en aras de conocer el rendimiento energético de los sistemas motorizados. | 02. Datos nominales del funcionamiento del motor (datos de placa) y medición de variables eléctricas, mecánicas y físicas del motor, en aras de conocer su consumo energético y su eficiencia (potencia, corriente, voltaje, par, etc.) | E3.A.3 Modelo Físico ISA 88 (censo de carga) |
| | G.3. Se debe identificar el consumo de energía de la red eléctrica y los sistemas accionados por motor. | ✓ Facturas de energía eléctrica de los últimos 2 o 3 años, para entender | E3.G3 - CONSUMO HISTORICO |

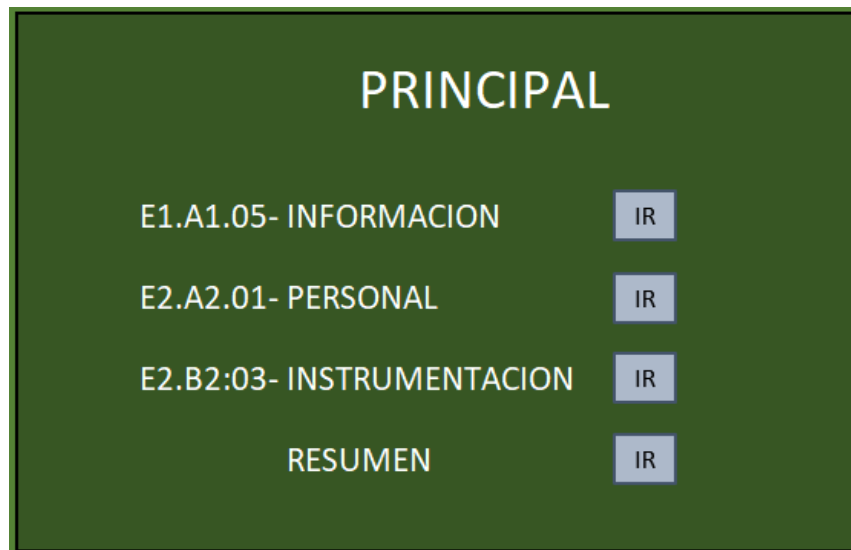
| | | | |
|--|---|---|---|
| | | la estructura energética de consumo energético. | |
| 5.1. Gestión del Trabajo en campo | B.5.1. Documentar las condiciones de operación actuales del sistema accionado por motor y las rutinas del operario; para diagnosticar el impacto que tienen en el rendimiento energético | | E5.1.B5.1 CENSO DE TIEMPOS DE PRODUCCION |
| 5.2. Visita al sitio | A.5.2. Auditor y equipo evaluativo llevaran a cabo operaciones directas en los sistemas accionados por motor y en la red de suministro. | | E5.2.A5.2 - MEDIDA DE VARIABLES ELECTRICAS, FISICAS Y MECANICAS |
| | | | E5.2.A5.2 - EFICIENCIA A TRAVES DE IEEE 112B |

Fuente propia, abril de 2019

- **Recolección de Información para la auditoría.**

Para dar inicio al levantamiento de información se presenta la herramienta de recolección digital “E1.E2. RECOLECCION DE INFORMACION INICIAL” (ver Figura 3.1), la cual se elaboró en Microsoft Excel, está constituida por 3 sub-formatos con los cuales se apoya el registro de información en las etapas del MAEM. Los formatos contenidos en la herramienta son “E1.A1.05-INFORMACION GENERAL”, “E2.A2.01-PERSONAL” e “E2.B2:03-INSTRUMENTACION” además, de una hoja nombrada “RESUMEN”, en donde se puede acceder desde el menú principal accionando el botón asociado a cada ítem:

Figura 3.1: Herramienta para la recolección de información inicial



Fuente: propia, abril de 2019

3.1. ETAPA 1: Planificación de la auditoría energética

3.1.1. Ejecución de la subetapa A.1 numeral 05

En la subetapa A.1, numeral 5, el auditor requiere saber cuál es la documentación o información que permite identificar como está constituida la organización; la ejecución de esta actividad está acompañada del formato “E1.A1.05– INFORMACION GENERAL” (ver Figura 3.2). Al iniciar el proceso de auditoría, el personal encargado de llevarlo a cabo, requiere conocer con qué documentación cuenta la empresa para apoyar dicho proceso. Mediante una encuesta (ver Figura 3.2) se verifica el tipo de información que contiene el establecimiento, de tal forma que ayude a entender la estructura de la organización, los procesos que realiza y los equipos que conforman estos procesos (diagrama del sistema eléctrico, diagrama P&ID, diagrama de flujo, etc.).

Por otro lado, el auditor debe obtener información para llevar a cabo un censo de carga de los equipos a diagnosticar (datos de placa), Además de un compendio histórico de facturas, para realizar un desglose de la demanda total de energía en la organización, para observar a través de gráficas de consumos anuales como es el comportamiento energético el sitio, cual es la cantidad de energía activa como reactiva utilizada, y en qué tiempos pueden presentarse sobre demandas de energía, lo que en algunos casos puede ocasionar sobrecostos por excesos de consumo de energía.

Figura 3.2: Encuesta sobre documentación de diagramación de la organización.

| PRINCIPAL | RESUMEN | E1.A1.05–INFORMACION GENERAL | |
|---|--------------------------|-------------------------------------|--|
| 1. La organización cuenta con documentación referente a la descripción y diagramación de los procesos y equipos en sitio? | | | |
| a | Modelo Físico de ISA s88 | <input type="checkbox"/> | |
| b | Diagrama P&ID | <input type="checkbox"/> | |
| c | Diagrama de flujo PFD | <input checked="" type="checkbox"/> | En el PFD se observa la secuencia del proceso, abarcando en recorrido y procesamiento de la materia prima hasta obtener el producto final. En algunos casos, de acuerdo a la distribución de la organización se encuentran PFDs por etapas, donde se detalla el flujo de materia a través de cada una de ellas. |
| d | Diagrama de Lazo | <input checked="" type="checkbox"/> | En el diagrama de lazo se encuentran las interconexiones eléctricas de la instrumentación incluyendo cajas de conexiones, puntos de conexiones, terminales, puertos y conexiones a tierra. Además, en este, pueden identificarse las fuentes de energía eléctrica y los circuitos de conexión de la instrumentación. |
| e | Otro tipo de Información | <input checked="" type="checkbox"/> | Serie de guías que muestran la conexión entre los diferentes elementos del sistema auditado y explican su funcionamiento. |
| 2. La organización tiene documentos que contengan información de auditorías energéticas ejecutadas anteriormente? | | | No |
| 3. La organización posee documentos con diagramas de diseño del sistema eléctrico? | | | Si |
| 4. La organización posee documentos de mantenimiento de los motores? | | | No |
| 5. La organización cuenta con las facturas de consumo energético de al menos un año atrás? | | | Si |
| 6. La organización cuenta con cualquier tipo de información relacionada con los procesos, sistemas y equipos del establecimiento? | | | No |

Fuente: propia, abril de 2019

Las respuestas afirmativas en el formato, están acompañadas de notas escritas por el equipo auditor, que indican la naturaleza y el tratamiento que se le debe dar a esta información (ver Figuras 3.2 y 3.3).

Figura 3.3: Notas a la encuesta sobre la documentación en la organización.

| RESUMEN DE INFORMACION | |
|------------------------|---|
| NOTA 1 | El auditor debe evaluar si la posibilidad de Aplicar ISA 88 para el reconocimiento del sitio a partir del diagrama PFD es oportuna. Tener en cuenta que ALCANCE, OBJETIVOS Y LOS LIMITES del proyecto deben ser revisados. Debe llegarse al acuerdo acerca de quien llevará a cabo el desarrollo de ISA 88. |
| NOTA 2 | |
| NOTA 3 | En los documentos en donde se enseñan la distribuciones de las redes eléctricas a través de la compañía, es posible determinar cuáles son los puntos eléctricos que pueden ser adoptados para realizar mediciones y sub-mediciones directas de consumo, ya sea en toda una unidad de producción o en una maquina específica, esto según lo permita dicha |
| NOTA 4 | Para realizar el censo de carga de los sistemas y elementos a auditar es necesario que se haga un desplazamiento del equipo auditor al sitio, en donde recolectará la información necesaria para elaborar el censo. |
| NOTA 5 | Las facturas de consumo permiten estudiar cuáles son las cantidades de energía activa y reactiva demandada en la organización, esto para evitar posibles sanciones, ya que existen casos en los que se presentan sanciones económicas por sobredemanda de potencias reactivas. Por tanto, revise cuáles son las cantidades de energía activa y reactiva demandada en la organización, tenga que el consumo de energía reactiva es mayor al 50% de la energía activa, entonces sobre ese límite se genera facturación. |
| NOTA 6 | |

Fuente: propia, abril de 2019

3.2. ETAPA 2: Reunión de apertura

En la segunda etapa especificada en el método propuesto MAEM, la herramienta de recolección está elaborada para ser manipulada por el auditor, cuando éste se encuentre efectuando actividades de la siguiente forma:

3.2.1. Ejecución de la subetapa A.2 numeral 01

En la subetapa A.2, numeral 1, es importante para el auditor definir cuál es el personal que lo acompañará y asistirá en las distintas actividades a ejecutar en la auditoría, es esencial que este conozca cual es el talento humano ya sea profesional o técnico que hace parte de la organización, capacitado principalmente en el sector eléctrico o con conocimientos sobre motores eléctricos.

El auditor registrará la información de cada individuo en el formato “E2.A2.01-PERSONAL” (ver Figura 3.4); en este registro es importante conocer, el sector dentro de la organización donde se desempeña cada persona, ya que esto facilita reconocer y seleccionar qué individuos están capacitados para desarrollar las actividades requeridas, las cuales van desde la instalación de equipos de medida hasta el apoyo en el análisis de los datos obtenidos.

Figura 3.4: Identificación del personal asociado a la auditoria energética.

| PRINCIPAL | | RESUMEN | | E2.A2.01 - PERSONAL | | | | | | |
|------------------|-----------------|-----------|--------------------|---------------------|-----------|--------|---------|--------|--|--|
| PERSONAL INTERNO | | | | | | | | | | |
| NOMBRE | AREA DE TRABAJO | PROFESION | HORARIO DISPONIBLE | | | | | | | |
| | | | LUNES | MARTES | MIERCOLES | JUEVES | VIERNES | SABADO | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |

Fuente: propia, abril de 2019

3.2.2. Ejecución de la subetapa B.2 numeral 03

Para la ejecución de la subetapa B.2, específicamente el numeral 3, las actividades requieren del registro de la instrumentación necesaria para llevar a cabo el plan de medición, para este caso el auditor está acompañado por el formato “E2.B2:03-INSTRUMENTACION” (ver Figura 3.5).

Este formato “E2.B2.03-INSTRUMENTACION”, presenta en su cara inicial el menú principal en donde se despliega la lista de los equipos necesarios para llevar a cabo la auditoría energética según MAEM. Para dar inicio al registro de los instrumentos basta que el usuario accione el botón “INGRESAR” asociado a cada uno de los instrumentos, luego de realizar esta acción, en el programa se muestra el formato en donde es posible consignar las características asociadas al instrumento seleccionado (ver Figura 3.6). Además, en el menú se presenta la cantidad de instrumentos anexados a cada sección.

Figura 3.5: Recolección de datos de instrumentación necesaria en la auditoría.

| E2.B2.03 - INSTRUMENTACION | | Nro |
|--|----------|-----|
| ANALIZADOR DE RED | INGRESAR | 0 |
| MEDIDOR DE ENERGIA | INGRESAR | 0 |
| MULTIMETRO | INGRESAR | 0 |
| ANALIZADOR DE CALIDAD DE ENERGIA Y VARIABLES MECANICAS DEL MOTOR | INGRESAR | 0 |
| OHMETRO DE PRECISION | INGRESAR | 0 |
| MEDIDOR DE TEMPERATURA | INGRESAR | 0 |
| MEDIDOR DE VELOCIDAD | INGRESAR | 0 |
| ELECTRODINAMOMETRO | INGRESAR | 0 |
| BANCO DE PRUEBAS | SI | |

Fuente: propia, abril de 2019

Figura 3.6: Formatos de características de la instrumentación en la auditoría.

| INSTRUMENTACION ANALIZADOR DE RED | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|--------------------|-------------------|----------------|-----------------------------|-------------------------------|-----------------------|-----------|--------------|-----------------|-----------|-------------------------------------|-----------|------------|------------------------|-------|------------|
| DESCRIPCION | NIVEL DE TENSION | HILOS | FRECUENCIA | PRECISION | | | | | | | | | | | | |
| | | ? | | PORCENTAJE | DIGITOS | CALIBRADO | | | | | | | | | | |
| | | ? | | | | | | | | | | | | | | |
| INSTRUMENTACION MEDIDOR DE ENERGÍA | | | | | | | | | | | | | | | | |
| DESCRIPCION | TIPO DE MEDICION | FASES | HILOS | ENERGIA | CLASE / ERROR | TENSION | CORRIENTE | FRECUENCIA | NÚMERO DE SERIE | CONDICION | SECTOR | | | | | |
| | | | | | ? | | | | | | | | | | | |
| | | | | | ? | | | | | | | | | | | |
| | | | | | ? | | | | | | | | | | | |
| INSTRUMENTACION ANALIZADOR DE CALIDAD DE ENERGÍA | | | | | | | | | | | | | | | | |
| DESCRIPCION | FRECUENCIA | VATIOS (EN AC) | | | CORRIENTE (AC) | | | TENSION (AC) | | | DISTORCION ARMONICA DE TENSION (AC) | | | ARMONICOS EN CORRIENTE | | |
| | | RANGO | RESOLUCION | PRECISION | RANGO | RESOLUCION | PRECISION | RANGO | RESOLUCION | PRECISION | CONFIG | RANGO | RESOLUCION | PRECISION | RANGO | RESOLUCION |
| | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | |
| INSTRUMENTACION MULTIMETRO | | | | | | | | | | | | | | | | |
| DESCRIPCION | CORRIENTE (AC) | VOLTAJE (AC) | CORRIENTE (DC) | VOLTAJE (DC) | PRECISION (AC) | PRECISION (DC) | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | |
| INSTRUMENTACION OHMETRO | | | | | | | | | | | | | | | | |
| DESCRIPCION | RANGOS DE MEDICION | | | RESOLUCION | | | PRECISION | | | | | | | | | |
| | OHM | FRECUENCIA | | OHM | FRECUENCIA | | OHM | FRECUENCIA | | OHM | FRECUENCIA | CALIBRADO | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | |
| INSTRUMENTACION MEDIDOR DE TEMPERTURA | | | | | | | | | | | | | | | | |
| DESCRIPCION | TIPO | RANGO DE MEDICION | RESOLUCION | PRECISION | ENTRADAS | MEDIDOR | CALIBRADO | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | |
| INSTRUMENTACION MEDIDOR DE VELOCIDAD | | | | | | | | | | | | | | | | |
| DESCRIPCION | MEDIDOR | RANGO | RESOLUCION | PRECISION | DISTANCIA | TEMPERATURA OPERATIVA | CALIBRADO | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | |
| INSTRUMENTACION ELECTRODINAMOMETRO | | | | | | | | | | | | | | | | |
| DESCRIPCION | RANGO DE TORQUE | VELOCIDAD | PRECISION | VOLTAJE DE ALIMENTACION (V) | CORRIENTE DE ALIMENTACION (A) | TIPO ALIMENTACION | CALIBRADO | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | |

Fuente: propia, abril de 2019

Una vez ejecutadas las etapas anteriores el auditor puede hacer revisión del formato Excel denominado “RESUMEN”, en donde se presenta un compendio que permite reconocer cual es la información obtenida en los formatos que hacen parte de la ejecución de la Etapa 1, subetapa A.1 numeral 05; y de la Etapa 2, subetapa A.2, numeral 01, así como de la subetapa B.2 numeral 03 (ver Figuras 3.7 y 3.8).

Figura 3.7: Resumen de los formatos de recolección de información inicial.

| PRINCIPAL | PERSONAL | IFORMACION | INSTRUMENTACION |
|---|---|------------|-----------------|
| INFORMACION | | | |
| PORCENTAJE DE LA DOCUMENTACION DISPONIBLE (%) | | 38% | |
| Modelos ISA | | | |
| Modelo Físico de ISA s88 | En el modelo físico, observe la información acerca de la distribución jerarquizada de los activos físicos (equipos) que se encuentran en la organización; hasta definir en que niveles (módulos) y secciones (Unidades) se encuentran los sistemas accionados por motor. | | |
| Diagrama P&ID | | | |
| Diagrama de flujo PFD | En este, se observa la secuencia del proceso, abarcando el recorrido y procesamiento de la materia prima hasta obtener el producto final. En algunos casos, de acuerdo a la distribución de la organización se encuentran PFDs por etapas, donde se detalla el flujo de materia a través cada una de ellas. | | |
| Diagrama de Lazo | | | |
| Sobre auditorías energéticas anteriores | En la organización, existen documentos referentes a la ejecución de auditorías energéticas aplicadas a la compañía en tiempo pasado. | | |
| Sobre diagramas del sistema eléctrico | | | |
| Documentos de mantenimiento de motores | Para realizar el censo de carga de los sistemas y elementos a auditar es necesario que se haga un desplazamiento del equipo auditor al sitio, en donde recolectará la información necesaria para elaborar el censo. | | |
| Facturas de consumo energético | | | |

Fuente: propia, abril de 2019

Figura 3.8: Resumen a las características de instrumentación identificadas para la auditoría

| INSTRUMENTACION | | | | | | | |
|---|--|-------------------------|-----------------------|--------------------------|-------------------------------|-----------------------------|-----------------------|
| En esta sección se presenta el número de instrumentos disponibles para realizar tomas de datos en la auditoría. | | | | | | | |
| ANALIZADOR DE RED | | NIVEL DE TENSION | DESCRIPCION | TENSION | HILOS | FRECUENCIA | PORCENTAJE |
| NUMERO DE INSTRUMENTOS TOTALES | | CALIBRADO | | | | | |
| 0 | | | | | | | |
| MEDIDOR DE ENERGIA | | TENSION | DESCRIPCION | TIPO DE MEDICION | FASES | HILOS | ENERGIA |
| NUMERO DE INSTRUMENTOS TOTALES | | CORRIENTE | FRECUENCIA | NUMERO DE SERIE | CONDICION | SECTOR | ERROR |
| 0 | | | | | | | |
| MULTIMETRO | | DESCRIPCION | CORRIENTE (AC) | VOLTAJE (AC) | CORRIENTE (DC) | VOLTAJE (DC) | PRECISION (AC) |
| NUMERO DE INSTRUMENTOS | | | | | | | PRECISION (DC) |
| 0 | | | | | | | |
| ANALIZADOR DE CALIDAD DE ENERGIA | | DESCRIPCION | PAR MOTOR | VELOCIDAD MOTOR | POTENCIA MECANICA | EFICIENCIA | FRECUENCIA |
| NUMERO DE INSTRUMENTOS | | VATIOS | CORRIENTE | VOLTAJE | ARMONICOS EN CORRIENTE | ARMONICOS EN VOLTAJE | CALIBRADO |
| 0 | | | | | | | |
| OHMETRO | | DESCRIPCION | OHM (RANGO) | OHM (RESOLUCION) | OHM (PRECISION) | CALIBRADO | |
| NUMERO DE INSTRUMENTOS | | | | | | | |
| 0 | | | | | | | |
| MEDIDOR DE TEMPERATURA | | DESCRIPCION | TIPO | RANGO DE MEDICION | RESOLUCION | PRECISION | ENTRADAS |
| NUMERO DE INSTRUMENTOS | | MEDIDOR | CALIBRADO | | | | |
| 0 | | | | | | | |
| MEDIDOR DE ROTACION | | DESCRIPCION | MEDIDOR | RANGO | RESOLUCION | PRECISION | DISTANCIA |
| NUMERO DE INSTRUMENTOS | | | | | | | |
| 0 | | | | | | | |

Fuente: propia, abril de 2019

3.3. ETAPA 3: Recopilación de datos.

3.3.1. Ejecución de la subetapa A.3

En el Capítulo 2 del MAEM, se observa que un punto fundamental para el auditor al momento de ejecutar el proceso de auditoría, es el reconocimiento de los activos físicos en la organización, esto con el objetivo de identificar los sistemas, procesos y equipos consumidores de energía eléctrica.

- **Modelo físico de ISA S88.01**

El modelo físico de ISA S88 permite realizar una descripción organizada de los activos físicos encontrados en el sitio, jerarquizándolos hasta definir los recursos más exigüos. Este presenta siete niveles, los tres primeros niveles describen la parte gerencial y administrativa (empresa, sitio y área), el estándar no abarca estos tres niveles debido a que son los encargados de soportar las decisiones corporativas de la empresa. Los cuatro niveles siguientes atañen a la jerarquización y descripción de los equipos en términos de célula de proceso, unidad, módulos de equipo y módulos de control. Con la anterior clasificación, el modelo físico del MAEM se realiza de la siguiente manera:

- ✓ **Empresa:** Universidad del Cauca, es la organización para el caso de estudio.
- ✓ **Sitio:** Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones (FIET), ubicada en el sector de Tulcán de la ciudad de Popayán.
- ✓ **Área:** dentro de la FIET se encuentra el departamento de electrónica, instrumentación y control, donde se localizan los laboratorios de control de procesos y maquinas.
- ✓ **Célula de proceso:** laboratorio de control de procesos y laboratorio de máquinas, estos contienen las plantas de proceso donde se desarrollan prácticas, que reproducen líneas de procesos industriales reales.
- ✓ **Unidad:** las unidades encontradas son siete: Planta Multivariable, Planta de Tanques en Serie, Planta de Nivel Amatrol, Planta de Temperatura, Planta de Clasificación, Planta Convertidor Giratorio de Frecuencia y Planta de presión.
- ✓ **Módulos de equipo:** a partir de este nivel, se tienen datos de mayor detalle, por lo que esta parte se consigna en una tabla, en que se presenta la información de los módulos de equipo que tiene cada unidad (ver anexo prediagnóstico).
- ✓ **Módulos de control:** son los equipos que llevan a cabo las acciones de control de los módulos de equipo de una unidad (ver anexo prediagnóstico).

Por tanto, para llevar a cabo la ejecución de la subetapa A.3 del MAEM, se brinda al auditor una herramienta desarrollada en Microsoft Excel titulada “E3.A.3 Modelo Físico ISA 88” (ver Figura 3.9), con la cual se realiza el levantamiento de información referente al modelo físico de la organización según ISA 88.01, ya que la obtención de este modelo posibilita tener una idea clara de cómo está compuesto el establecimiento en sus procesos y equipos.

La herramienta TIC mencionada, cuenta con dos hojas denominadas “REGISTRO” y “DATOS”; en la primera de ellas (ver Figura 3.9), se presenta el formulario de recolección, cuya estructura está dividida en dos partes, la primera es aquella destinada al registro de la información correspondiente al modelo físico según ISA 88 del sitio auditado, en donde se registran los diferentes niveles del modelo; empresa, sitio, área, célula de proceso, unidad, módulo de equipo y módulo de control.

En la segunda parte, el formulario permite seleccionar el módulo de control, que para todos los casos es un motor eléctrico, desplegando una nueva ampliación en el formato para agregar la información de placa, esto con el objetivo de elaborar un censo de carga (ver Figura 3.11), al mismo tiempo en que se registra la información que pertenece al modelo físico de la compañía. Debe tenerse en cuenta que el almacenamiento de la información agregada, se lleva a cabo mediante el botón “GUARDAR”.

Presionando el botón “DATOS” se despliega en el programa la segunda hoja (ver Figura 3.10), está es la sección en donde la herramienta almacena la información ingresada, por tanto, es ahí donde el auditor identifica como se ha almacenado de manera jerárquica la composición del establecimiento (sitio y área), así como sus procesos y equipos (célula de proceso, unidad, módulos de equipo y de control). Todo esto con el objetivo de generar un documento que permita conocer de manera organizada como está estructurado el lugar, y también de a conocer información de la empresa en caso de presentarse procesos de auditoria en el futuro. Además

Figura 3.9: Levantamiento del modelo físico de ISA S88 en formato digital

| FORMULARIO MODELO FISICO ISA S88.01 | |
|-------------------------------------|----------------------|
| EMPRESA | <input type="text"/> |
| SITIO | <input type="text"/> |
| AREA | <input type="text"/> |
| CELULA DE PROCESO | <input type="text"/> |
| UNIDAD | <input type="text"/> |
| MODULO DE EQUIPO | <input type="text"/> |
| MODULO DE CONTROL | <input type="text"/> |
| MOTOR DE INDUCCIÓN | SI |
| DATOS | |
| TIPO DE MOTOR | SINCRONO |
| NIVEL DE TENSIÓN | <input type="text"/> |
| NIVEL DE CORRIENTE | <input type="text"/> |
| TIEMPO DE VIDA | <input type="text"/> |
| VARIADOR? | <input type="text"/> |
| POTENCIA HP | <input type="text"/> |
| EFICIENCIA | <input type="text"/> |
| HORAS FUNCIONAMIENTO POR MES | <input type="text"/> |
| TRANSMISION CAJA O BANDA | <input type="text"/> |
| % DE CARGA | <input type="text"/> |

Fuente: propia, abril de 2019.

Figura 3.10: Modelo físico según ISA S88 en formato digital.

| MODELO FISICO ISA S88.01 | | | | | | |
|--------------------------|-------|------|-------------------|--------|------------------|-------------------|
| REGISTRO | | | | | | |
| EMPRESA | SITIO | AREA | CELULA DE PROCESO | UNIDAD | MODULO DE EQUIPO | MODULO DE CONTROL |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |

Fuente: propia, abril de 2019

3.3.2. Ejecución de la subetapa C.3 numeral 02

En el paso por el levantamiento del modelo físico en la organización, debido a que, al presentarse módulos de control correspondientes con motores eléctricos, fueron diligenciados los campos menesteres acerca de la información de las características de cada motor encontrado, el auditor dispone de cierta variedad de campos en el censo de carga (ver Figura 3.11), elaborado mediante el formato “E3.A.3 Modelo Físico ISA 88” que, a través de filtros en el programa pueden clasificarse según sea requerido, por ejemplo, tiempo de vida y potencia de cada motor, lo cual asociado con el modelo físico ya obtenido, permite al auditor según sus criterios, vislumbrar en qué unidades o módulos de equipo es oportuno actuar. Uno de los casos es, unidades en donde estén localizados los motores de mayor potencia, ya que puede ser ahí donde se presentan mayores consumos.

Figura 3.11: Censo de carga en formato digital.

| CENSO DE CARGA | | | | | | | | | | |
|--------------------|---------------|------------------|--------------------|----------------|-----------|----------|------------|----------------------|--------------------------|------------|
| MOTOR DE INDUCCIÓN | TIPO DE MOTOR | NIVEL DE TENSIÓN | NIVEL DE CORRIENTE | TIEMPO DE VIDA | VARIADOR? | POTENCIA | EFICIENCIA | HORAS FUNCIONAMIENTO | TRANSMISION CAJA O BANDA | % DE CARGA |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |

Fuente: propia, abril de 2019

3.3.3. Ejecución de la subetapa G.3

La ejecución de la subetapa G.3 está acompañada del formato para recolección digital denominado “E3.G3-CONSUMO HISTORICO” (ver Figura 3.12), cuya manipulación se hace para obtener las gráficas que muestran la línea de consumo histórico energético en organización a partir de la facturación del consumo mensual de energía.

Las facturaciones de los periodos mensuales de consumo de energía eléctrica en la organización, son medios útiles para entender cuál es la estructura de consumo presente en la empresa, ya que, mediante un desglose de uso y consumo de energía, es posible conocer cuál es el porcentaje de energía eléctrica demandado en la compañía y cuál es el representado por otras fuentes energéticas en caso de que existan. Por esto es importante que el auditor disponga de tantas facturas como sea posible.

Una vez se tengan las facturas de energía, es necesario graficar los consumos tanto en términos de energía activa, como reactiva; ya que en las gráficas obtenidas el auditor observa cual es el patrón de consumo energético de la organización, y también, es posible que logre reconocer inconsistencias tales como presencia de picos de consumo anormales, además de obtener una relación entre el consumo eléctrico y la producción.

Para agilizar el manejo de la información contenida en las facturas, se brinda una herramienta que registra el consumo mensual facturado a lo largo de doce meses, luego, mediante los botones denominados “GRAFICO” se despliegan dos graficas que muestran el consumo de energía activa y reactiva en esos doce meses.

Figura 3.12: Consumos históricos de energía eléctrica activa y reactiva

| FACTURAS DE ENERGÍA ACTIVA, MENSUAL | | | AÑO: | 0 | FACTURAS DE ENERGÍA REACTIVA, MENSUAL | | | AÑO: | 0 |
|-------------------------------------|---------------------------------|------------|---------|---|---------------------------------------|---------------------------------|------------|---------|---|
| Mes | Consumo de energía activa (KWh) | Costo (\$) | | | Mes | Consumo energía reactiva (KWhR) | Costo (\$) | | |
| Enero | 0 | 0 | GRAFICO | | Enero | 0 | 0 | GRAFICO | |
| Febrero | 0 | 0 | | | Febrero | 0 | 0 | | |
| Marzo | 0 | 0 | | | Marzo | 0 | 0 | | |
| Abril | 0 | 0 | | | Abril | 0 | 0 | | |
| Mayo | 0 | 0 | | | Mayo | 0 | 0 | | |
| Junio | 0 | 0 | | | Junio | 0 | 0 | | |
| Julio | 0 | 0 | | | Julio | 0 | 0 | | |
| Agosto | 0 | 0 | | | Agosto | 0 | 0 | | |
| Septiembre | 0 | 0 | | | Septiembre | 0 | 0 | | |
| Octubre | 0 | 0 | | | Octubre | 0 | 0 | | |
| Novembre | 0 | 0 | | | Novembre | 0 | 0 | | |
| Diciembre | 0 | 0 | | | Diciembre | 0 | 0 | | |
| Consumo total | 0 | | | | Consumo total | 0 | | | |
| Costo total | 0 | | | | Costo total | 0 | | | |

Fuente: propia, abril de 2019

3.4. ETAPA 5.1: Gestión del trabajo de campo

3.4.1. Ejecución de la subetapa B.5.1

Dentro de las organizaciones industriales, un factor importante que se debe tener en cuenta al momento de evaluar la eficiencia de los procesos y la maquinaria inmersa en estos, es el tiempo que requieren las áreas de producción para fabricar los productos. Mediante la fijación de indicadores se puede conocer, por ejemplo, cuál es el tiempo necesario para fabricar una unidad de producto, o la cantidad de tiempo necesario para fabricar varios productos por día o mes.

3.4.1.1. Tiempos de producción

Para este caso se desarrolló un formato de recolección digital llamado “E5.1.B5.1 CENSO DE TIEMPOS DE PRODUCCION” (ver Figura 3.13), con el cual se recolecta la información, referente a la cantidad de tiempo que requiere un proceso para elaborar determinado producto.

Figura 3.13: Censo de tiempos de producción en un proceso.

| FECHA | | MAQUINA/PROCESO | | | | |
|----------|---------------------|---------------------|-----------------------------|-----------------------------|------------------------------|---------------|
| PRODUCTO | UNIDADES PRODUCIDAS | TIEMPO UNIDAD (MIN) | TIEMPO TOTAL UNIDADES (MIN) | TIEMPO FUNCIONAMIENTO (MIN) | TIEMPO FUNCIONAMIENTO (HORA) | |
| | | | 0 | 0 | 0 | NUEVO FORMATO |
| | | | 0 | | | NUEVA PAGINA |
| | | | 0 | | | |
| | | | 0 | | | |
| | | | 0 | | | |
| | | | 0 | | | |
| | | | 0 | | | |

Fuente: propia, abril de 2019

3.4.1.2. Estimaciones del consumo energético mensual en los motores.

Dentro del proceso de diagnóstico energético en una organización, es importante conocer el consumo de energía que se presenta en las unidades de producción, para esto se lleva a cabo una estimación en campo de la demanda de energía consumida por los sistemas accionados por motor (EMDS) en la línea de producción de cada unidad.

En la estimación del consumo de energía de los EMDS de las unidades de producción, es necesario que el auditor registre los valores de voltaje, corriente, factor de potencia y horas de funcionamiento de cada uno de los equipos que conforman el EMDS, particularmente los motores eléctricos que son los que comandan estos sistemas. En algunos casos los datos correspondientes a los parámetros eléctricos del motor son tomados de la placa proporcionada por el fabricante, pero en otros casos, que suele ser la mayoría de veces, las empresas tienen equipos sin placa de identificación, para estas situaciones se recomienda realizar una toma de datos en campo del motor.

Por otro lado, se requieren conocer las horas de funcionamiento del motor por día o mes y elaborar un registro de las horas de actividad de cada motor en la unidad de producción. Durante este proceso el auditor debe diligenciar la herramienta “E5.1.B5.1 CENSO DE CARGA EN CAMPO” (ver Figura 3.14), con la cual puede registrar las variables mencionadas anteriormente. Por otro lado, es importante mencionar que, en la mayoría de los casos, es necesario que se haya diligenciado primero el formato “E5.1.B5.1 CENSO DE TIEMPOS DE PRODUCCION”.

valor presentado por ejemplo en la placa de identificación del motor, esto significa que existen imperfecciones en el funcionamiento del motor, y por tanto es necesario establecer estrategias para reajustar dicho factor de potencia.

Figura 3.15: Medida de variables eléctricas, mecánicas y físicas.

| MEDICIONES DIRECTAS DE VARIABLES ELECTRICAS, MECANICAS Y FISICAS | |
|---|--------------------|
| TAG | |
| Nº FASES | 3 |
| CONFIGURACION DE DEVANADOS | Y |
| MEDIDA DE LA TENSION ELECTRICA | |
| CONFIGURACION DE MEDIDA | Voltaje de Línea |
| VOLTAJE DE LINEA 1 [V] | 0 |
| VOLTAJE DE LINEA 2 [V] | 0 |
| VOLTAJE DE LINEA 3 [V] | 0 |
| VOLTAJE DE LINEA PROMEDIO [V] | 0 |
| VOLTAJE DE LINEA [V] | 0 |
| MEDIDA DE LA CORRIENTE ELECTRICA | |
| CONFIGURACION DE MEDIDA | Corriente de Línea |
| CORRIENTE DE LINEA 1 [A] | 0 |
| CORRIENTE DE LINEA 2 [A] | 0 |
| CORRIENTE DE LINEA 3 [A] | 0 |
| CORRIENTE DE LINEA PROMEDIO [A] | 0 |
| CORRIENTE DE LINEA [A] | 0 |
| MEDIDA DE LA POTENCIA ACTIVA | |
| POTENCIA ACTIVA A-N [W] | 0 |
| POTENCIA ACTIVA B-N [W] | 0 |
| POTENCIA ACTIVA C-N [W] | 0 |
| POTENCIA ACTIVA TOTAL [W] | 0 |
| DETERMINACION DEL FACTOR DE POTENCIA | |
| S (P Aparato) [VA] | 0 |
| FP | 0.000000 |
| MEDIDA DE LA TEMPERATURA | |
| TEMPERATURA DE DEVANADOS [°C] | |
| MEDIDA DEL PAR | |
| PAR MECANICO [N.m] | |
| MEDIDA DE LA VELOCIDAD DE ROTACION | |
| VELOCIDAD DE ROTACION [RPM] | |

Fuente: propia, abril de 2019

3.5.1.2. Estimación de la eficiencia del motor según IEEE 112-B

La aplicación denominada “E5.2.A5.2-EFICIENCIA A TRAVES DE IEEE 112B” basada en TIC, permite el cálculo del valor de eficiencia del motor. Esta herramienta está desarrollada en el software Microsoft Excel 2016, contiene 3 hojas denominadas “Principal”, “Cálculo manual” y “Configuraciones”, estas tres secciones son necesarias, tanto para la recolección de los datos obtenidos en las pruebas, como para la realización de los cálculos automáticos o manuales; necesarios para la obtención de la eficiencia del motor. La lógica matemática que desarrolla la herramienta de recolección digital para calcular la eficiencia energética

del motor auditado está contenida en el Anexo D “Soporte matemático para el cálculo de eficiencia con IEEE 112-B”.

Nota: debe tenerse en cuenta que las casillas en blanco son aquellas destinadas a recibir los datos medidos en las pruebas del método.

3.5.1.2.1. Página principal

En la página “Principal” se registrarán los datos proporcionados por el fabricante del motor a través de la placa de datos, y toda la información obtenida a través de cada una de las pruebas del método IEEE 112B (Prueba de resistencia al frío, temperatura a carga nominal, prueba bajo carga, prueba sin carga y corrección del dinamómetro) que deben recolectarse para obtener al final la eficiencia del motor estudiado. El formato en esta página puede distribuirse de la siguiente manera:

- Datos de Placa.

En esta sección debe ser recolectada (ver Figura 3.16) la información contenida en la placa del motor, teniendo en cuenta que para la óptima aplicación del método es obligatorio llenar la información solicitada, cuya casilla está señalada por un asterisco (*), de igual relevancia es el valor de k1 que representa el material de los bobinados del motor.

Figura 3.16: Plantilla para la recolección de datos de placa.

| RECOLECCION DE DATOS METODO IEEE 112 B | | | | | |
|--|----|----------------------------|------|----|---|
| Tipo | | Voltios | | K1 | 0 |
| Diseño | | Serial | | | |
| Frame | | Aumento de temp [°C] | | | |
| Rating | | Time rating | | | |
| Fase* | 3 | Model No | | | |
| Número de polos* | 4 | Conexión devanado* | Δ | | |
| Frecuencia (Hz)* | 60 | Velocidad sincronica (Rpm) | 1800 | | |

Fuente: propia, abril de 2019

- Datos de Prueba de resistencia al frío.

En esta sección (ver Figura 3.17) el programa recibe el valor de las resistencias en los bobinados del motor en frío, así como la temperatura para la cual dichos bobinados en frío presentan la resistencia dada.

Figura 3.17: Plantilla para la recolección de datos de resistencia al frío y temperatura.

| PROCEDIMIENTO | | | |
|----------------------------------|---------------------------|---|--------------------------|
| PRUEBA DE RESISTENCIA AL FRIO | Temperatura ambiente [°C] | 0 | Resistencia promedio [Ω] |
| | R →T1-T2 [Ω] | 0 | 0 |
| | R →T2-T3 [Ω] | 0 | |
| | R →T3-T1 [Ω] | 0 | |

Fuente: propia, abril de 2019

- Datos de prueba de temperatura a carga nominal.

La prueba de temperatura a carga nominal requiere de información relevante, como la resistencia de los devanados del motor, una vez este haya alcanzado la estabilización térmica. Además del valor de la temperatura ambiente (Ver Figura 3.18). También, si el auditor tiene la facilidad de medir la temperatura de los bobinados del motor cuando este alcanza la estabilización térmica, puede recolectar esta información habilitando el cuadro .

Figura 3.18: Plantilla para introducir datos de la prueba de temperatura a carga nominal.

| | | | |
|---------------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|-----------|
| PRUEBA DE TEMPERATURA A CARGA NOMINAL | Temperatura ambiente [°C] | 0 | |
| | R → T1-T2 [Ω] | 0 | |
| | R → T2-T3 [Ω] | 0 | |
| | R → T3-T1 [Ω] | 0 | |
| | Temperatura medida directamente | <input checked="" type="checkbox"/> | VERDADERO |
| | Temperatura a carga nominal [°C] | 0 | |

Fuente: propia, abril de 2019

- Datos de prueba con carga.

La prueba con carga al motor está planificada para desarrollarse en 6 puntos de carga. Teniendo en cuenta que deben ser dos puntos de carga por encima del 100% de carga y tres puntos de carga por debajo del 100%; además de incluirse el 100% de carga del motor. En esta prueba el programa otorga dos opciones respecto a la recolección de los datos ya sea del valor de las resistencias de los devanados de estator o el valor de la temperatura de bobinados de estator, dependiendo de la facilidad que tenga el usuario para obtener una medida o la otra; Dicha selección se hace habilitando una opción u otra mediante el cuadro (ver Figura 3.19) ya que cualquiera de las dos opciones es válida para la estimación de la eficiencia.

Figura 3.19: Plantilla de recolección de datos de prueba bajo carga.

| | | | | | | | |
|-------------------|---------------------------------|-------------------------------------|-----------|------|-----|-----|-----|
| PRUEBA BAJO CARGA | Resistencia medida directamente | <input checked="" type="checkbox"/> | VERDADERO | | | | |
| | Puntos de carga (%) | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| | Par [N.m] | 150% | 125% | 100% | 75% | 50% | 25% |
| | Velocidad [Rpm] | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | Temperatura ambiente [°C] | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | Voltaje de línea [V] | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | Corriente de línea [A] | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | Potencia de entrada [W] | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | Frecuencia [Hz] | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | R → T1-T2 [Ω] | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | R → T2-T3 [Ω] | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | R → T3-T1 [Ω] | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Fuente: propia, abril de 2019

- Datos de prueba sin carga.

La prueba sin carga al motor se desarrolla en seis puntos distintos de valores de voltaje de entrada. Teniendo en cuenta que deben ser dos puntos de voltaje por

encima del 100% del voltaje nominal y tres puntos por debajo del 100% del voltaje nominal; además de incluirse el 100% de valor del voltaje nominal. En esta prueba el programa otorga dos opciones respecto a la recolección de los datos ya sea del valor de las resistencias de los devanados de estator o el valor de la temperatura de bobinados de estator, dependiendo de la facilidad que tenga el usuario para obtener una medida o la otra; Dicha selección se hace habilitando una opción u otra mediante el cuadro (ver Figura 3.20) ya que cualquiera de las dos opciones es válida para la estimación de la eficiencia.

Figura 3.20: Plantilla para datos de prueba sin carga.

| PRUEBA SIN CARGA | Temperatura medida directamente | <input type="checkbox"/> | FALSO | | | | |
|------------------|---------------------------------|--------------------------|-------|------|-----|-----|-----|
| | Puntos de voltaje (%) | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| | | 150% | 125% | 100% | 75% | 50% | 25% |
| | Temperatura ambiente [°C] | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | Voltaje de línea [V] | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | Corriente de línea [A] | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | Potencia de entrada [W] | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | Temperatura de bobinado [°C] | | | | | | |
| | R →T1-T2 [Ω] | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | R →T2-T3 [Ω] | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | R →T3-T1 [Ω] | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Fuente: propia, abril de 2019

- Datos de corrección de dinamómetro.

Dado el caso en que se necesite realizar una corrección al valor del dinamómetro (esto es, cuando en la prueba de carga no se ha utilizado un medidor de par en línea), el formato permite realizar la corrección mediante la habilitación en la casilla respectiva,

| | | |
|---------------------------|-------------------------------------|-----------|
| Corrección de Dinamómetro | <input checked="" type="checkbox"/> | VERDADERO |
|---------------------------|-------------------------------------|-----------|

que posteriormente permite al usuario ingresar los datos necesarios obtenidos de las Pruebas A y B del método para llevar a cabo la corrección del dinamómetro (ver Figura 3.21). Igual que en etapas anteriores el programa permite al usuario mediante un criterio de selección ya sea registrar el valor de medido de las Resistencias de bobinados o el valor de temperatura medido en los bobinados de estator para cada una de las pruebas A y B del método.

Figura 3.21: Plantilla para datos de corrección de dinamómetro.

| Corrección de Dinamómetro | | <input checked="" type="checkbox"/> | VERDADERO |
|---------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|-----------|
| PRUEBA A | Temperatura medida directamente | <input type="checkbox"/> | FALSO |
| | Potencia de entrada A [W] | 0 | |
| | Corriente de línea A [A] | 0 | |
| | Voltaje de línea A [V] | 0 | |
| | Velocidad A [Rpm] | 0 | |
| | Par A [N.m] | 0 | |
| | Temperatura de bobinado A | | |
| | R → T1-T2 [Ω] | 0 | |
| | R → T2-T3 [Ω] | 0 | |
| R → T3-T1 [Ω] | 0 | | |
| PRUEBA B | Potencia de entrada [W] | 0 | |
| | Corriente de línea [A] | 0 | |
| | Voltaje de línea [V] | 0 | |
| | Velocidad [Rpm] | 0 | |
| | Par [N.m] | 0 | |
| | Temperatura de bobinado | | |
| | R → T1-T2 [Ω] | 0 | |
| | R → T2-T3 [Ω] | 0 | |
| | R → T3-T1 [Ω] | 0 | |

Fuente: propia, abril de 2019

- Resultado de eficiencia energética.

Como punto final, se muestra el resultado de la eficiencia del motor evaluado para cada punto de carga aplicado (ver Figura 3.22).

Figura 3.22: Datos de Eficiencia en Excel.

| EFICIENCIA | Puntos de carga (%) | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|------------|---------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | Eficiencia (%) | #¡DIV/0! | #¡DIV/0! | #¡DIV/0! | #¡DIV/0! | #¡DIV/0! | #¡DIV/0! |

Fuente: propia, abril de 2019

3.5.1.2.2. Página de cálculo manual

En los casos en que el resultado arrojado por el programa de algunos parámetros como la pérdida de núcleo o el suavizado de la carga dispersa no es satisfactorio (esto es cuando el factor de correlación de la regresión es pequeño), el usuario puede hacer el cálculo de estas pérdidas de manera manual.

- Pérdida de núcleo

Dentro de la hoja, en primer punto se muestra el resultado del valor de los parámetros como el valor de la pendiente y el factor de correlación obtenidos en la ecuación de una regresión lineal (ver Figura 3.23) realizada por el programa.

Al seleccionar la casilla para habilitar el cálculo manual

| | | |
|----------------------------|-------------------------------------|-----------|
| Perdida de núcleo (Manual) | <input checked="" type="checkbox"/> | VERDADERO |
|----------------------------|-------------------------------------|-----------|

se despliega la tabla que contiene los valores del voltaje de línea y la pérdida de núcleo en los seis puntos de

voltaje aplicados, de tal manera que el usuario pueda realizar una gráfica con estos valores para obtener los valores de los parámetros A, B y C de una ecuación polinómica de segundo grado e ingresarlos en el lugar correspondiente.

Figura 3.23: Plantilla para datos de pérdida de núcleo.

| Pérdida de núcleo (Manual) | | <input checked="" type="checkbox"/> | VERDADERO | | | | |
|-----------------------------------|---|-------------------------------------|-----------|---|---|---|---|
| Voltaje de línea [V] | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| (Sin carga) Pérdida de núcleo [W] | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| A | 0 | | | | | | |
| B | 0 | | | | | | |
| C | 0 | | | | | | |

Fuente: propia, abril de 2019

- Suavizado de carga dispersa.

Cuando en el suavizado de la pérdida de carga dispersa el factor de correlación obtenido es bajo (menor a 0,9), el programa permite hacer dicho suavizado manualmente después de habilitar la opción correspondiente (ver Figura 3.24), para que el usuario pueda realizar una gráfica eliminando el peor punto y obtener nuevamente los valores de los coeficientes de la ecuación lineal.

Figura 3.24: Plantilla de datos de suavizado de pérdida de carga dispersa.

| Suavizado de Carga dispersa (Manual) | | <input checked="" type="checkbox"/> | VERDADERO | | | | |
|--|----------|-------------------------------------|-----------|----------|----------|----------|----------|
| (PAR corregido) ² [N.m] (X) | #¡DIV/0! | #¡DIV/0! | #¡DIV/0! | #¡DIV/0! | #¡DIV/0! | #¡DIV/0! | #¡DIV/0! |
| Pérdida de carga dispersa [w] (Y) | #¡DIV/0! | #¡DIV/0! | #¡DIV/0! | #¡DIV/0! | #¡DIV/0! | #¡DIV/0! | #¡DIV/0! |
| R ² | 0 | | | | | | |
| A (Pendiente) | 0 | | | | | | |
| B | 0 | | | | | | |
| Correlación | 0 | | | | | | |

Fuente: propia, abril de 2019

3.5.1.2.3. Página de Configuraciones

En la hoja “Configuraciones” el programa realiza todos los cálculos pertinentes especificados en el método IEEE 112B, en donde se tienen como entradas los datos tomados en cada una de las pruebas de del método y mediante las ecuaciones señaladas en el mismo método es posible calcular las pérdidas Constantes (Pérdidas por fricción y viento, y pérdidas de núcleo), las pérdidas dependientes de la carga (Pérdidas de rotor y pérdidas de estator) y las pérdidas adicionales (Pérdidas de carga dispersa); y posteriormente obtener la eficiencia del motor para cada punto de carga en el que es el motor es analizado (ver Figura 3.25).

CAPITULO 4

4. APLICACIÓN DEL MAEM

Antes de iniciar el proceso de ejecución del MAEM es necesario destacar que, debido a la naturaleza del lugar auditado el cual no es un entorno típicamente industrial, se trata de un laboratorio en donde se reproducen procesos llevados a cabo en la industria el alcance del MAEM esta limitado. Además de lo anterior, el proceso conlleva dificultades presentadas por la carencia de algunos instrumentos de auditoria vitales para efectuar de manera prolija el proceso de medición estipulado en el método propuesto (ver Capítulo 2); es natural que el proceso de ejecución del MAEM presente vacíos en su desarrollo y morfología. Teniendo esto en claro, el proceso de diagnóstico se desarrolló de la siguiente forma:

La ejecución del MAEM se divide en dos partes, la primera atañe a un proceso de prediagnóstico, en donde se realiza una auditoria energética preliminar la cual implica efectuar un proceso de recolección de documentación del establecimiento, además de un recorrido por la instalación, para familiarizarse con la operación del sitio auditado. En la segunda parte se lleva a cabo un proceso de diagnóstico ligado a la ejecución de una auditoria detallada; en la cual se efectúan mediciones en los sistemas de proceso seleccionados, y se desarrolla un análisis de la información y datos recolectados, con el fin de encontrar mejoras de eficiencia y ahorro energético en los sistemas evaluados.

4.1. PREDIAGNÓSTICO DEL MAEM

La ejecución del MAEM fue llevada a cabo en su totalidad por el grupo de trabajo encargado de desarrollar el presente proyecto de grado según alcance, limite y objetivos definidos (ver Etapa 1, Subetapa A.1, numeral 2). Dicho grupo de trabajo cuenta con las capacidades e idoneidad necesaria, para efectuar acciones de medición, análisis, manejo de equipos, aplicación de normativas, etc., a lo largo de del proceso de ejecución. Por otro lado, en cuanto al contexto de la auditoria, no existen requisitos reglamentarios, planes estratégicos o sistemas de gestión que afecten o impidan ejecutar el método propuesto en el lugar.

4.1.1. Visita al sitio

Lo primero que se realizó fue una visita de reconocimiento al sitio, este se sitúa en la Universidad del Cauca, en la Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, ubicada en el sector de Tulcán en la ciudad de Popayán. En dichas instalaciones se encuentra el Departamento de electrónica, instrumentación y control, el cual contiene el laboratorio de control de procesos. Este laboratorio posee sistemas de control de procesos o plantas como se les suele llamar, que reproducen estaciones de procesos industriales reales. En estas plantas se desarrollan prácticas llevadas a cabo por estudiantes de pregrado del programa de

Ingeniería en Automática Industrial. El laboratorio mencionado, poseen siete plantas de control: Planta Multivariable, Planta de Tanques en Serie, Planta de Nivel Amatrol, Planta de Temperatura, Planta de Presión, Planta de Clasificación y Planta de Conversión de giro y Frecuencia (ver Anexo F).

En la inspección al sitio se observó que de las siete plantas de proceso que alberga el laboratorio, todas contienen sistemas accionados por motor eléctrico (EMDS) de distinta naturaleza. De los cuales, tres son sistemas de bombeo de agua (Planta multivariable, Amatrol y tanques en serie); dos son sistemas de movimiento (Planta de clasificación y Planta de conversión de giro y frecuencia), una es un sistema de ventilación (Planta de temperatura), y la última es un sistema de compresión (Planta de presión).

La mayoría de los EMDS que conforman las plantas de proceso anteriormente descritas, están comandados por motores eléctricos con potencias de entrada menores a 0,75 kW. Lo anterior pudo representar una limitante al momento de aplicar el método, dado que el MAEM fue definido para ser efectuado en equipos que conforman el nivel uno de tensión, es decir motores eléctricos de tamaño mediano, comúnmente usados en aplicaciones industriales, con una entrada de potencia de 0,75 kW a 375 kW (ver capítulo 2). Sin embargo, se decidió seguir con el proceso de ejecución del método, ya que dos de las siete plantas de proceso, la de clasificación y conversión de giro y frecuencia, contienen motores eléctricos en sus EMDS con potencias de consumo cercanas al rango establecido en el MAEM, además sus características físicas permiten llevar a cabo un proceso de diagnóstico energético en ellos.

Después de constatar la naturaleza de cada una de las plantas de proceso, se entrevistó al encargado del funcionamiento y mantenimiento del laboratorio de control de procesos, el ingeniero Daniel Fernando Draco Astudillo, el cual procedió a diligenciar el formulario denominado "INFORMACION", ubicado en la herramienta de recolección de datos digital "E1.E2-RECOLECCION DE INFORMACION INICIAL" (ver Anexo Digital "Formatos de recolección en Unicauca"). Por medio de este formulario se busca tener una visión clara de la documentación existen en el sitio, que permita entender como están conformados los procesos y su dinámica de funcionamiento. El cuestionario resuelto se muestra en la Figura 4.1.

Figura 4.1: Formulario de recolección de información de la organización auditada.

| Verificar si la organización dispone de la siguiente documentación | |
|--|--|
| 1. La organización cuenta con documentación referente a la descripción y diagramación de los procesos y equipos en sitio? | |
| a Modelo Físico de ISA s88 <input type="checkbox"/> | |
| b Diagrama P&ID <input checked="" type="checkbox"/> | Ya que el diagrama P&ID es la representación visual del proceso industrial, mediante este es posible comprender cuales y como son los procesos dentro de la organización, además, permite identificar como esta distribuida la instrumentacion en campo de la organizaion. |
| c Diagrama de flujo PFD <input type="checkbox"/> | |
| d Diagrama de Lazo <input checked="" type="checkbox"/> | En el diagrama de lazo se encuentran las interconexiones electricas de la intrumentacion incluyendo cajas de conexiones, puntos de conexiones, terminales, puertos y conexiones a tierra. Además, en este, pueden identificarse las fuentes de energia electrica y los circuitos de conexion de la instrumentacion |
| 2. La organización tiene documentos que contengan informacion de auditorias energéticas ejecutadas anteriormente? | |
| No | |
| 3. La organización posee documentos con diagramas de diseño del sistema electrico? | |
| Si | |
| 4. La organización posee documentos de mantenimiento de los motores? | |
| No | |
| 5. La organización cuenta con las facturas de consumo energético de al menos un año atrás? | |
| No | |
| 6. La organización contiene cualquier tipo de informacion relacionada con los procesos, sistemas y equipos del establecimiento? | |
| Si | |
| NOTA 1 | El auditor y la organización deben revisar de manera rigurosa EL ALCANCE, OBJETIVOS Y LIMITES, debido a que en la entidad falta documentación propicia que facilita el reconocimiento oportuno de sus equipos y procesos |
| NOTA 2 | |
| NOTA 3 | En los documentos en donde se enseñan la distribuciones de las redes electricas a traves de la compañía, es posible determinar cuales son los puntos electricos que pueden ser adoptados para realizar mediciones directas de consumo, ya sea en toda una unidad de producción o en una maquina especifica, esto segun lo permita dicha distribución. |
| NOTA 4 | Para realizar el censo de carga de los sistemas y elementos a auditar es necesario que se haga un desplazamiento del equipo auditor al sitio, en donde recolectará la informacion necesaria para elaborar el censo. |
| NOTA 5 | |
| NOTA 6 | Revise si en la documentación presentada, existen datos que pueden ser relevantes en la ejecución de la auditoria, tales como Guias de manejo de la instrumentación , tiempos de operación de los sistemas, cantidades de producto elaboradas por unidades de tiempo, o cualquier documentación que aporte información valiosa para llevar a cabo la auditoria energética. |

Fuente: Propia, mayo de 2018.

De la información analizada, se concluyó que gran parte de esta va encaminada a desarrollar procesos a nivel de software del sistema (identificación y control). La parte restante se encarga de identificar el componente hardware de este. De esta última parte se obtuvo documentación relacionada con la aplicación del estándar ISA S.5 (diagramas PFD, P&ID y de lazo de los sistemas), y una serie de guías explicativas, las cuales describe los sistemas de procesos llevados a cabo en el laboratorio (ver Anexo F).

De manera análoga, se interrogó al encargado sobre la instrumentación que dispone el lugar, para llevar a cabo el proceso de medición y recolección de datos. Luego de una revisión a la instrumentación encontrada en el sitio, se hizo un registro del tipo de equipos de medición con que cuenta el establecimiento auditado y el equipo evaluativo, en el formulario denominado "INSTRUMENTACION", perteneciente a la

herramienta de recolección de datos digital E1.E2-RECOLECCION DE INFORMACION INICIAL (ver Figura 4.2).

Figura 4.2: Instrumentación encontrada para realizar las medidas.

| INSTRUMENTACION | | | | | | | MULTIMETRO | | | | | | |
|------------------------|---|--|---|---|----------------|--------------------------------|-----------------------|--|--|--|--|--|--|
| DESCRIPCION | CORRIENTE (AC) | VOLTAJE (AC) | CORRIENTE (DC) | VOLTAJE (DC) | PRECISION (AC) | PRECISION (DC) | | | | | | | |
| FLUKE 187 (7001150182) | 0 mA - 20 A 0 μ A - 5000 μ A | 0 - 1000.0 V 0 - 3000.0 mV | 0 mA - 20 A 0 μ A - 5000 μ A | 0 - 1000.0 V 0 - 3000.0 mV | Voltaje 0.4 % | Voltaje 0.025 % | | | | | | | |
| FLUKE 187 (7001150176) | 0 mA - 20 A 0 μ A - 5000 μ A | 0 - 1000.0 V 0 - 3000.0 mV | 0 mA - 20 A 0 μ A - 5000 μ A | 0 - 1000.0 V 0 - 3000.0 mV | Voltaje 0.4 % | Voltaje 0.025 % | | | | | | | |
| INSTRUMENTACION | | | | | | | MEDIDOR DE TEMPERTURA | | | | | | |
| DESCRIPCION | TIPO | RANGO DE MEDICION | RESOLUCION | PRECISION | ENTRADAS | MEDIDOR | CALIBRADO | | | | | | |
| NOVUS UK SMARTMETER | Tipo K | (-)150 a 1370 $^{\circ}$ C | 0.1 $^{\circ}$ C | 0.25 % F.S. \pm 1 $^{\circ}$ c | 2 | Termopar | SI | | | | | | |
| NOVUS THERMOMETER 305 | Tipo K | (-)50 $^{\circ}$ C a 1300 $^{\circ}$ C | 0.1 $^{\circ}$ C | 0.3 % \pm 1 $^{\circ}$ C | 1 | Termopar | SI | | | | | | |
| INSTRUMENTACION | | | | | | | MEDIDOR DE VELOCIDAD | | | | | | |
| DESCRIPCION | MEDIDOR | RANGO | RESOLUCION | PRECISION | DISTANCIA | TEMPERATURA OPERATIVA | CALIBRADO | | | | | | |
| SHIMPO DT-105A | Tacómetro de Contacto | 0.10 a 25,000 rpm | 0,01 | \pm 0.06 rpm: 0.10 a 999.99 rpm \pm 0.6 rpm: 1,000.0 a 9,999.9 rpm \pm 0.006% de la lectura \pm 1 dígito (o \pm 2rpm máx.); 10,000 a 25,000 rpm | | 0 $^{\circ}$ - 45 $^{\circ}$ C | SI | | | | | | |

Fuente: Propia, mayo de 2018.

4.1.2. Levantamiento de información

Después de desarrollar el proceso de recolección y análisis de información de las plantas que conforman el laboratorio auditado; se concluyó que, la información encontrada del sitio es importante ya que brinda documentación importante sobre los procesos realizados en el lugar, además de servir para que el equipo auditor comprenda la naturaleza y funcionamiento de dichos procesos.

No obstante, este proceso resulta más sencillo, ya que para ejecutar el plan de medición y recolección de datos descrito en el MAEM (ver Capítulo 2), se necesita hacer un desglose de cada uno de los equipos que conforma el sistema de proceso, y en particular identificar el EMDS que lo comanda, para tener en claro cómo y en donde realizar las mediciones y toma de datos. Además de dejar un documento que en el futuro sirva para conocer el lugar, en caso de que se presente otro proceso de auditoría.

Dado lo anterior, se decidió aplicar el modelo físico de ISA 88.01, esto con el objetivo de generar una descripción organizada y rápida de los diferentes elementos que componen el establecimiento a auditar (ver sección 3.3.1). Además de apoyarse en la información encontrada (diagramas ISA S.5 y guías de manejo y caracterización de las plantas de proceso).

Para llevar a cabo el levantamiento del modelo físico de ISA S88.01 en el laboratorio de control de procesos se hizo uso de la herramienta digital “E3.A.3-MODELO FISICO ISA 88” (ver Anexo Digital “Formatos de recolección en Unicauca”), la cual contiene los formatos “REGISTRO” y “DATOS”, en estos el equipo auditor organizar

los activos físicos de la empresa, jerarquizándolos hasta definir los recursos más exiguos. Además, mediante esta herramienta, también se realizó el censo de carga de los valores de consumo energético de placa, de los equipos que conforman los EMDS de las plantas de proceso, (ver figura Figura 4.3).

Figura 4.3: Censo de carga con valores de placa de los equipos que conforman el EMDS de las plantas auditadas.

| CENSO DE CARGA | | | | | | | | | | | | |
|----------------------------|-----|---------------|----------------------|------------------------|----------------|-----------|--------------|------------|-------------------|--------------------------|------------|------|
| MODULO DE CONTROL | MOT | TIPO DE MOTOR | NIVEL DE TENSION (V) | NIVEL DE CORRIENTE (I) | TIEMPO DE VID. | VARIADOR? | POTENCIA (W) | EFICIENCIA | HORAS FUNCIONAMIE | TRANSMISION CAJA O BANDA | % DE CARGA | RPM |
| Motor trifasico M3 | SI | ASINCRONO | 208 | 2 | | SI | 373 | 74 | | CAJA | | 1725 |
| Encoder ENC | NO | | | | | | | | | | | |
| Motor jaula de ardilla MC | SI | ASINCRONO | 208 | 1.2 | | NO | 175 | | | | | 1670 |
| Variador SIC1 | NO | | | | | | | | | | | |
| Motor de rotor devanado MG | SI | ASINCRONO | 208 | 1.3 | | SI | 175 | | | BANDA | | |
| Motor sincrono MM | SI | SINCRONO | 208 | 0.8 | | SI | 175 | | | BANDA | | 1800 |

Fuente: Propia, mayo de 2018.

4.1.3. Recopilación de facturas de consumo energético

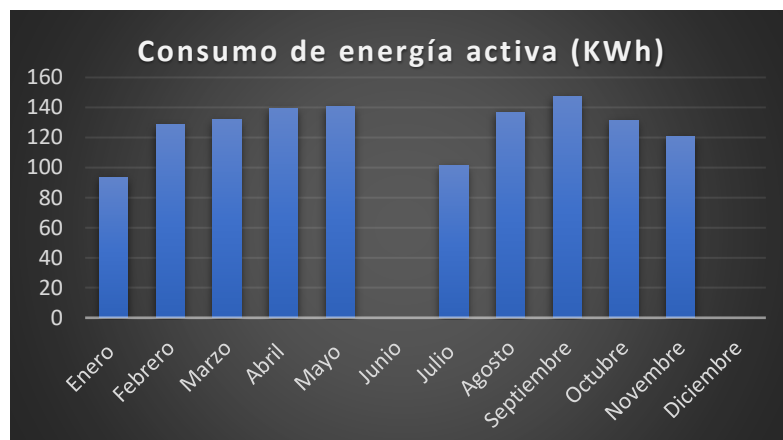
La recopilación de las facturas va encaminada a conocer el historial de consumo energético del sitio de al menos doce meses atrás, para observar el comportamiento del consumo real de este, identificando un promedio mensual y comparándolo con el consumo estimado mediante el censo de carga realizado posteriormente.

Para obtener las facturas de consumo de energía eléctrica del sitio, fue necesario recurrir a la división administrativa y de servicios de la Universidad del Cauca. La cual entrego las facturas de consumo energético correspondientes al año 2018, del campus universitario conocido como Tulcán. Se denomina así al sector perteneciente a la universidad del cauca conformado por cuatro facultades dentro de las cuales se encuentra la Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones; además del centro deportivo universitario CDU. Cabe aclarar que la facturación del sitio estaba incompleta debido a que, en la documentación recibida, no se encuentra la factura correspondiente a los meses de junio y diciembre del año correspondiente. Tras obtener las facturas de consumo energético, se desarrolló un proceso de toma de datos en estas, con el fin de graficar los valores que representan el nivel de consumo de energía activa (ver Figura 4.4) y reactiva (ver Figura 4.5) en Tulcán en el año 2018, dicho proceso se efectuó a través de la herramienta de recolección digital “E3.G3-CONSUMO HISTORICO” contenida en el Anexo Digital “Formatos de recolección”.

Por otro lado, en el proceso de auditoría el grupo auditor encontró un inconveniente al intentar realizar un desglose energético, que dé a conocer el valor de consumo de energía eléctrica que presenta la Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, específicamente el laboratorio de Control de procesos. Esto

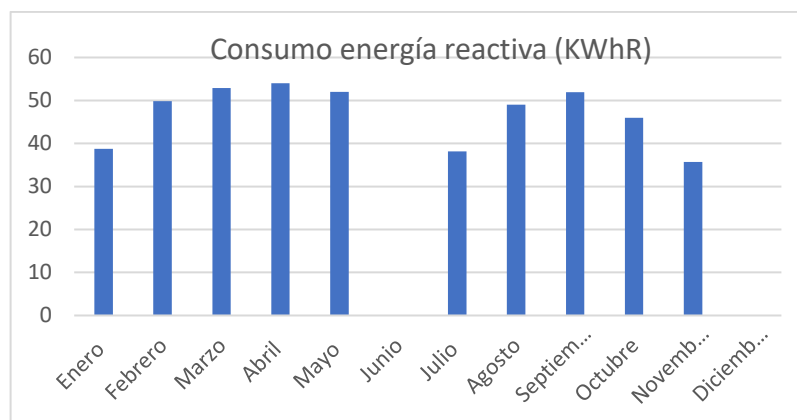
debido a que no existen medidores independientes mediante los cuales se pueda registrar el consumo de energía de la facultad, puesto que la distribución del campus de Tulcán solo contiene un medidor energético que registra el consumo total, presentado en las diferentes facultades que conforman el campus incluyendo el centro deportivo. Por tal razón, fue imposible efectuar el desglose energético que permita conocer los valores de consumo de energía eléctrica, de los diferentes procesos que conforman el laboratorio de control de procesos. Ya que, conociendo el consumo de los sistemas que alberga el laboratorio, se establece una medida comparativa con los valores de consumo eléctrico de placa, de los distintos equipos que conforman los sistemas auditados (censo de carga). Y así de esta manera, se podría conocer cuál es el valor real de consumo de energía eléctrica de dichos equipos

Figura 4.4: Consumo de energía activa en Tulcán del año 2018.



Fuente: Propia, mayo de 2018.

Figura 4.5: Consumo de energía reactiva en Tulcán del año 2018.



Fuente: Propia, mayo de 2018.

4.2. PROCESO DE DIAGNOSTICO DEL MAEM

Teniendo en claro los diferentes sistemas y equipos que conforman el establecimiento auditado, se ejecutó la recopilación de datos y el plan de medición estipulados en el MAEM (ver sección 2.3.1. Etapa 3 y 4). Se realizaron mediciones y toma de datos dividiendo el sistema accionado por motor, en cuatro partes, sistema de transmisión, sistema motor simple y sistema de velocidad.

4.2.1. Toma de datos del sistema de transmisión en las plantas de clasificación y conversión de giro y frecuencia

En los EMDS normalmente se implementan sistemas de transmisión entre el motor y la carga impulsada. El propósito de su uso se debe a una variedad de razones tales como, lograr la alineación entre el motor y la carga; transmisión del par de carga; variación de velocidad de rotación; etc. Los tipos de sistemas de transmisión más utilizados en los EMDS son los acoplamientos mecánicos, las transmisiones por correa, los engranajes, las cadenas y los piñones.

Se realizó un análisis de los sistemas de transmisión implementados por los EMDS de las dos plantas de procesos seleccionadas, realizando una descripción detallada de los elementos que lo conforman, para posteriormente definir oportunidades de mejora entorno al estado y funcionamiento de estos.

4.2.1.1. Planta de clasificación

La planta de clasificación es una unidad que permite clasificar piezas por medio de un sistema de visión artificial. Está constituida por dos bandas, una principal y otra auxiliar que giran en sentido opuesto, unidas por un sistema de engranajes que se ubican en las finalizaciones de los ejes de los rodillos de cada banda. El flujo continuo de movimiento al sistema es proporcionado por un EMDS, el cual consta de un motor de inducción trifásico, conectado a una caja reductora de velocidad con relación 5:1 y a los rodillos de la banda, a través de un sistema de poleas (ver Figura 4.6). Además, un variador de velocidad se encarga de control de velocidad del sistema, fijando el valor de la velocidad desde un HMI hacia un PLC, encargado del control de todo el sistema (ver Anexo F).

Figura 4.6: Sistema de proceso planta de clasificación



Fuente: Propia, mayo de 2018.

Después de observar el funcionamiento de la planta, en particular del EMDS que implementa, se hizo un análisis de los distintos sistemas de transmisión utilizados por este. De la siguiente manera:

4.2.1.1.1. Transmisión por correa

La planta de clasificación implementa un sistema de poleas, que a través de un motor de inducción trifásico y una caja reductora transfieren la velocidad de rotación a los rodillos de las bandas (ver Figura 4.7). Las correas que utiliza el sistema son del tipo conocido como trapezoidal sin estrías; estas van unidas a tres poleas de tres canales, ubicadas en los ejes del motor, de la caja reductora y de uno de los rodillos de la banda.

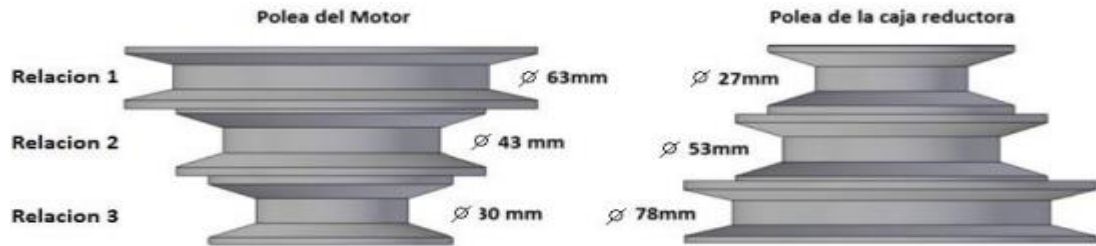
Figura 4.7: Sistema de transmisión por correa del EMDS de la planta clasificadora.



Fuente: Propia, mayo de 2018.

El reductor funciona a tres velocidades diferentes, por medio de tres cambios en la relación del diámetro entre la polea del motor y la polea del reductor, como se observa en la Figura 4.8. Las tres velocidades de entrada (1070, 1635 y 2700 rpm) se configuran cuando la correa de conexión entre las poleas del motor y la caja reductora se ubican en una de las tres relaciones posibles (ver Tabla 4.1).

Figura 4.8: Relación entre diámetros del juego de poleas del motor y caja reductora



Fuente: Propia, febrero de 2019.

Tabla 4.1: Velocidades máximas de la caja reductora

| | Relación 1 | Relación 2 | Relación 3 |
|---------------------|------------|------------|------------|
| Vel. Entrada | 1070 rpm | 1635 rpm | 2700 rpm |
| Vel. Salida | 42 rpm | 67 rpm | 112 rpm |

Fuente: Propia, febrero de 2019.

4.2.1.1.2. Transmisión por engranaje

En este sistema existe dos elementos que efectúan transmisión a través de engranajes, por un lado, está la caja reductora que se encarga de disminuir la velocidad de entrada a una relación de engranajes de 5:1. Y por el otro, un sistema de engranajes de Teflón (PTFE – Politetrafluoroetileno) de 36 dientes del tipo recto, utilizados para transmitir el movimiento entre los ejes de los rodillos de las bandas, Figura 4.9 y 4.10.

Figura 4.9: Sistemas de engranajes conectados a los ejes de los rodillos.



Fuente: Propia, mayo de 2018.

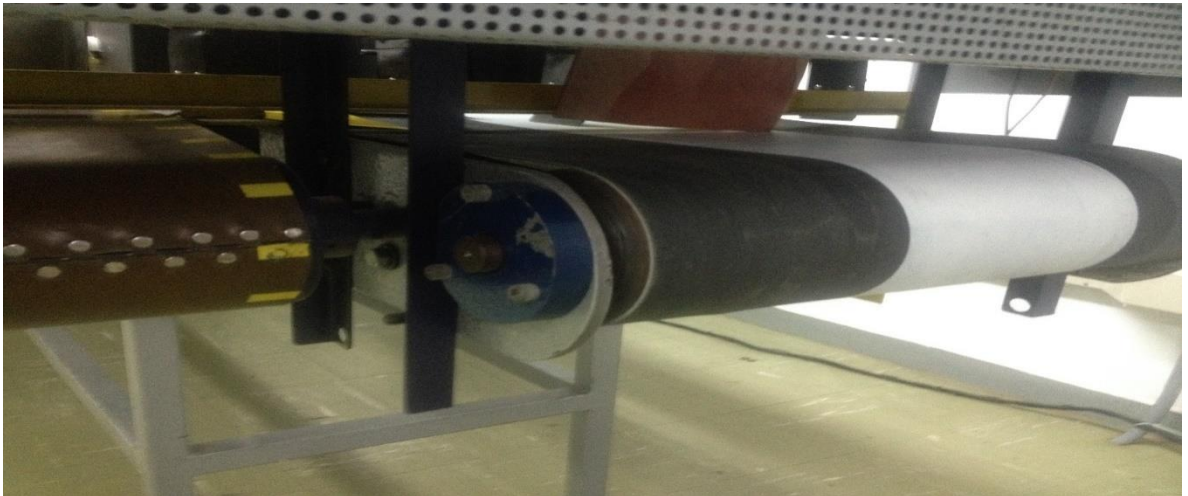
Figura 4.10: Reductor encargado de la disminución de velocidad en el sistema.



Fuente: Propia, mayo de 2018.

Por otro lado, a cada lado de la estructura de la banda, están instaladas chumaceras de una pulgada, donde descansan los ejes de los rodillos, facilitando el movimiento giratorio de ellos (ver Figura 4.11).

Figura 4.11: chumaceras para facilitar el movimiento giratorio de los rodillos.



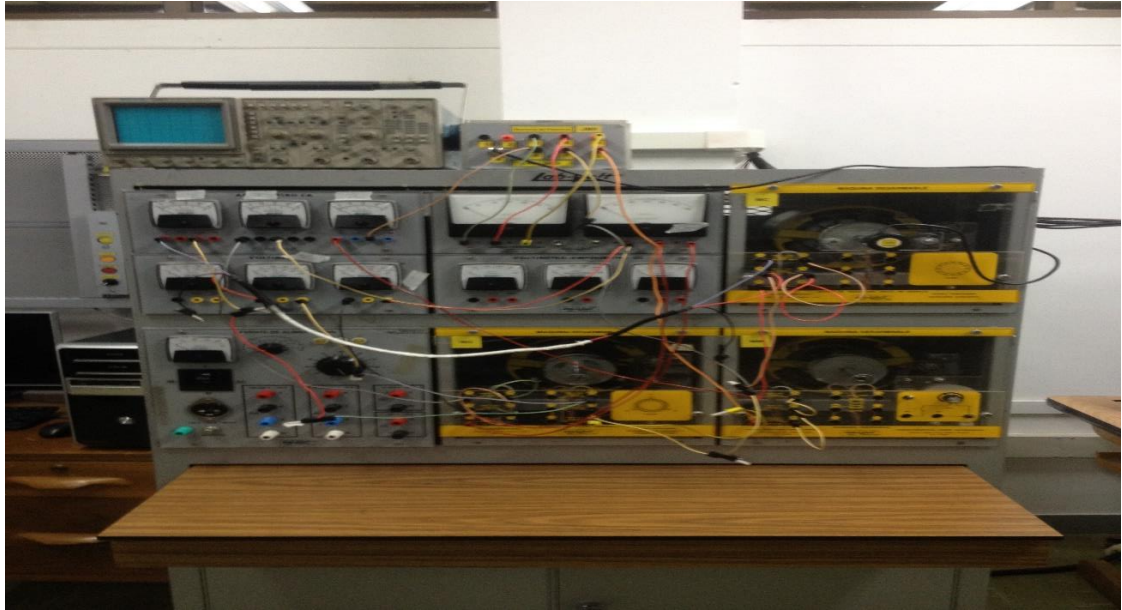
Fuente: Propia, mayo de 2018.

4.2.1.2 Planta de conversión de giro y frecuencia

Después de revisar el sistema de transmisión de la planta clasificadora, se prosiguió con el proceso de conversión de giro y frecuencia. Esta planta es un sistema de control de frecuencia, en el cual el elemento básico para ejercer dicho control, es un motor de inducción de rotor devanado que actúa como generador. El generador hace uso de una potencia mecánica suministrada a través de un sistema de

transmisión por correa, por un motor síncrono que gira a una determinada velocidad, controlada por un variador de velocidad. La frecuencia de salida en las fases del generador está determinada por la velocidad del motor al que se encuentra acoplado y a la frecuencia de entrada al inductor del generador (ver Figura 4.12).

Figura 4.12: Sistema de proceso planta de conversión de giro y frecuencia.



Fuente: Propia, mayo de 2018.

De manera análoga al procedimiento realizado en la planta clasificadora, se observó el funcionamiento del EMDS que implementa el proceso de conversión de giro y frecuencia, y se llevó a cabo un análisis de los distintos sistemas de transmisión utilizados por este. Cabe resaltar, que la planta de conversión de giro y frecuencia está conformada con base a un banco de pruebas para motores eléctricos, el cual permite disponer los equipos de manera tal que no se haga necesario utilizar un sistema de acoples entre ellos; exceptuando el sistema de transmisión por correa que utiliza para conectar los motores eléctricos entre sí. Dicho sistema de transmisión se conforma por lo siguiente.

4.2.1.1.3. Transmisión por correa

La planta de conversión de giro y frecuencia implementa un sistema de poleas de un solo canal conectadas a los ejes de cada motor, que permiten transmitir la potencia mecánica a través de una correa plana con estrías, del motor síncrono al motor de inducción de rotor devanado. Además, el sistema dispone de un conjunto de balineras, que permiten ajustar la correa para que no se desalinee (ver Figura 4.13).

Figura 4.13: Sistema de transmisión por correa de la planta de conversión de giro y frecuencia.



Fuente: Propia, mayo de 2018.

4.2.2. Toma de datos en el sistema motor simple de las plantas de clasificación y conversión de giro y frecuencia

Se le denomina sistema motor simple al componente principal de un EMDS, que para todos los casos es el motor eléctrico. Los sistemas auditados, están conformados en su sistema motor simple por dos tipos de equipos; por un lado, está el motor de inducción trifásico marca Baldor 0.373 Kw de potencia y 1782 rpm, perteneciente a la planta de clasificación. Por el otro, un motor síncrono marca LabVolt de 0.175 Kw y 1800 rpm, perteneciente a la planta de conversión de giro y frecuencia (ver Figuras 4.14 y 4.15).

Figura 4.14: Motor eléctrico que comanda el EMDS de la planta de clasificación.



Fuente: Propia, mayo de 2018.

Figura 4.15: Motor eléctrico del EMDS de la planta de conversión de giro y frecuencia.



Fuente: Propia, mayo de 2018.

Para iniciar el proceso de toma de datos, lo primero que se realizó fue recopilar los datos nominales de los dos motores. Esta información se encuentra descrita en la placa de información de cada equipo, o en su defecto si la placa es ilegible, se deberá buscar la orden de compra o el documento donde se describan las características de este. Una vez obtenidos los datos básicos, y con la información proporcionada, se efectuó el proceso de medición de variables eléctricas, mecánicas y físicas de cada motor.

Antes de iniciar el proceso de toma de datos, cabe destacar que, para la medición de las variables eléctricas, mecánicas y físicas del motor, se estipularon tres opciones en el MAEM (ver Etapa 3, Subetapa C.3, Numeral 2). Debido al difícil acceso y al alto costo de obtener un equipo que pueda medir variables in situ del motor (eficiencia, par, voltaje, etc.) [13], tal y como lo describe la opción 1, esta no se realizó en el ejercicio del caso de estudio. Aunque se deja como la opción más deseable, ya que con este tipo de equipos se facilita la toma de todas las variables requeridas y el proceso de medición se lleva a cabo de manera cómoda y con resultados fiables (ver Figura 4.16)

Figura 4.16: Analizador de variables del motor in situ y de calidad eléctrica.



Fuente: Propia, mayo de 2018.

Teniendo en cuenta lo anterior, se eligió desarrollar la segunda y tercera opción. Las cuales van encaminadas a realizar pruebas para el cálculo de dichas variables, con el fin de obtener el valor de eficiencia del motor, utilizando un banco de ensayos equipado con la instrumentación necesaria para ello. Y particularmente que permita hacerlo aplicando el estándar IEEE 112-B; a pesar de que esto implique tener que realizar el proceso de medición con el motor auditado fuera de su línea de producción (el proceso realizado de la implementación del estándar IEEE 112-B se encuentra detallado en el Anexo E).

Por último, la tercera opción se llevó a cabo ejecutando el plan de medición detallado en la sección 2.3.1, Etapa 4; con el objetivo de obtener los datos que permitan conocer el rendimiento energético del motor. El proceso se desarrolló de la siguiente manera.

4.2.2.1.1. Motor de inducción trifásico del EMDS de la planta clasificadora

El proceso inició con la recopilación de los valores nominales del motor Baldor (ver Figura 4.17). Esta información se encuentra descrita en la placa de información que trae cada motor, o en su defecto si la placa es ilegible, se deberá acceder a la orden de compra o el documento donde se describan las características de este. Los datos recolectados se introdujeron en la herramienta digital “E3.A.3-MODELO FISICO ISA 88”, formato “DATOS”.

Figura 4.17: Censo de carga con valores de placa de los equipos que conforman el EMDS de las plantas auditadas

| CENSO DE CARGA | | | | | | | | | | | | |
|----------------------------|-------|---------------|----------------------|------------------------|---------------|-----------------------|----------------------------|-------------------------|---------------------|--------------------------|------------|------|
| MODULO DE CONTROL | MOTOR | TIPO DE MOTOR | NIVEL DE TENSION (V) | NIVEL DE CORRIENTE (I) | TIEMPO DE VID | VARIADOR ² | POTENCIA (W ¹) | EFICIENCIA ¹ | HORAS FUNCIONAMIENT | TRANSMISION CAJA O BANDA | % DE CARGA | RPM |
| Motor trifasico M3 | SI | ASINCRONO | 208 | 2 | | SI | 373 | 74 | | CAJA | | 1725 |
| Encoder ENC | NO | | | | | | | | | | | |
| Motor jaula de ardilla MC | SI | ASINCRONO | 208 | 1.2 | | NO | 175 | | | | | 1670 |
| Encoder SE | NO | | | | | | | | | | | |
| Variador SIC2 | NO | | | | | | | | | | | |
| Variador SIC1 | NO | | | | | | | | | | | |
| Motor de rotor devanado MG | SI | ASINCRONO | 208 | 1.3 | | SI | 175 | | | BANDA | | |
| Motor sincrónico MM | SI | SINCRONO | 208 | 0.8 | | SI | 175 | | | BANDA | | 1800 |

Fuente: Propia, mayo de 2018.

Luego de obtener la información de placa del motor, se procedió a medir las variables eléctricas, mecánicas y físicas de este. El proceso se realizó teniendo en cuenta las siguientes recomendaciones:

- Evaluación del entorno antes de tomar la medición.
- No trabajar solo en áreas peligrosas.
- Usar equipo de protección individual adecuado, según las recomendaciones locales de salud y seguridad.
- Asegurarse de que el instrumento de prueba este calificado para el ambiente de medición.
- Conocer y saber utilizar el equipo antes de cualquier medición.

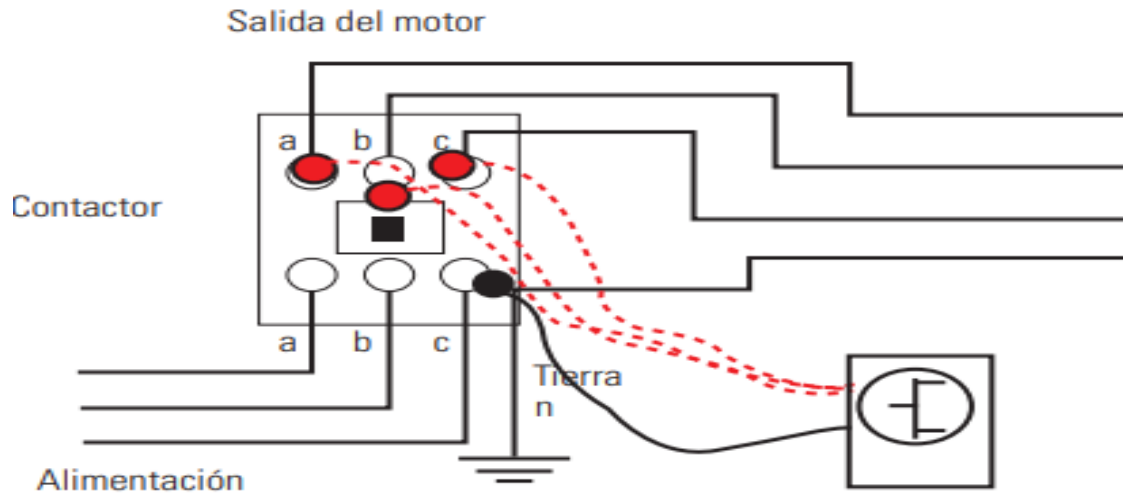
Variables eléctricas

Las variables eléctricas que se midieron durante el funcionamiento del motor, fueron voltaje y corriente eléctrica. Para simplificar el proceso de medición de estas variables, se recomienda utilizar un analizador de redes eléctricas que, además de permitir la medición de parámetros por fases, integra dichas mediciones para obtener directamente los valores trifásicos, almacena en memoria información para obtener tendencias y, en la mayoría de los casos, mide otros parámetros eléctricos que son importantes para evaluar la calidad de la energía utilizada en el equipo, como la distorsión armónica, entre otros. Debido a que no se pudo contar con este dispositivo, se optó por medir cada variable con un multímetro, de la siguiente manera:

Medición de la tensión eléctrica (voltaje)

La medición de la tensión eléctrica se realizó teniendo como referencia la Figura 4.18. Se procedió de la siguiente forma:

Figura 4.18: Figura descriptiva para la medición de voltaje de entrada al motor.



Fuente: Propia, mayo de 2019.

1. La medición se llevó a cabo en los cables de tensión eléctrica que salen del contactor hacia el motor, colocando el cable rojo del multímetro sobre la punta de salida del contactor en la línea “a”, y el cable negro del voltímetro sobre la punta de tierra “n” (ver Figura 4.19). Y se registró la lectura de tensión (V_{an}), correspondiente a la línea “a”. Se repitió la acción colocando el cable rojo del multímetro en la punta de salida “b” y “c” del contactor (con el negro a tierra), y se tomaron lecturas respectivas de tensión (V_{bn}) en línea “b” y tensión (V_{cn}) en línea “c”.

Figura 4.19: Medición del voltaje de entrada al motor de inducción trifásico Baldor.



Fuente: Propia, mayo de 2018.

2. Los valores medidos de cada línea, se registraron en la herramienta digital de recolección de datos “E5.2.A5.2-MEDIDA DE VARIABLES ELECTRICAS”; la cual arroja el voltaje de línea entregado al motor (ver Figura 20).

Figura 4.20: Valores de voltaje de línea medidos en el motor Baldor.

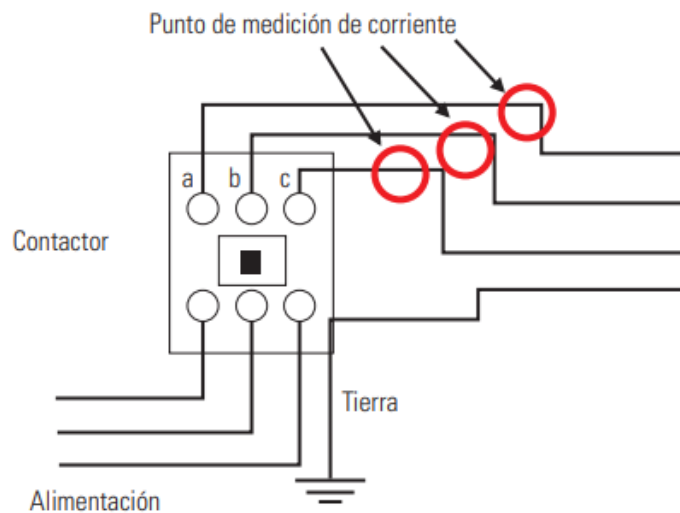
| MEDIDA DE LA TENSION ELECTRICA | |
|---------------------------------------|------------------|
| CONFIGURACION DE MEDIDA | Voltaje de Linea |
| VOLTAJE DE LINEA 1 [V] | 195 |
| VOLTAJE DE LINEA 2 [V] | 195 |
| VOLTAJE DE LINEA 3 [V] | 195 |
| VOLTAJE DE LINEA PROMEDIO [V] | 195 |
| VOLTAJE DE LINEA [V] | 195 |

Fuente: Propia, mayo de 2018.

Medición de la corriente eléctrica

La medición de la corriente eléctrica se efectuó teniendo como referencia la Figura 4.21.

Figura 4.21: Figura descriptiva para la medición de la corriente de entrada al motor.



Fuente: Propia, mayo de 2018.

Dependiendo de los instrumentos que se dispongan, se realiza de la siguiente forma:

1. En caso de utilizar un analizador de redes, no será necesario realizar las lecturas de corriente eléctrica en forma individual, sino que habrá que colocar tres pinzas

amperimétricas simultáneamente en cada uno de los cables que salen del contactor y alimentan el motor. Así, la lectura de la corriente eléctrica de cada cable se obtiene directamente en la pantalla del analizador.

2. Para este caso se utilizó un multímetro que hace las veces de amperímetro. Abriendo el circuito, se colocó el cable rojo del multímetro en el punto de salida del contactor perteneciente a la línea “a” y el cable negro del multímetro se conectó a la línea “a”, y se registró la lectura de corriente (I_a) (ver Figura 4.22). Se repitió la acción tomando lecturas respectivas de corriente (I_b) en línea “b” y corriente (I_c) en línea “c”.

Figura 4.22: Medición de corriente de entrada al motor Baldor.



Fuente: Propia, mayo de 2018.

3. Todos los valores medidos, se registraron en la herramienta digital de recolección de datos “E5.2.A5.2-MEDIDA DE VARIABLES ELECTRICAS”, el cual arroja el valor de corriente de línea suministrado al motor (ver Figuras 4.23).

Figura 4.23: Valores de corriente de línea medidos a la entrada del motor Baldor.

| MEDIDA DE LA CORRIENTE ELECTRICA | |
|---|--------------------|
| CONFIGURACION DE MEDIDA | Corriente de Linea |
| CORRIENTE DE LINEA 1 [A] | 1,7 |
| CORRIENTE DE LINEA 2 [A] | 1,7 |
| CORRIENTE DE LINEA 3 [A] | 1,7 |
| CORRIENTE DE LINEA PROMEDIO [A] | 1,7 |
| CORRIENTE DE LINEA [A] | 1,7 |

Fuente: Propia, mayo de 2018.

Factor de potencia

Con los valores de corriente y voltaje obtenidos anteriormente, se obtuvo el factor de potencia mediante el formato “E5.2.A5.2-MEDIDA DE VARIABLES ELECTRICAS, FISICAS Y MECANICAS” (ver figura 4.24). Como puede observarse en la figura 4.28, el FP obtenido es de 0.65, lo que representa un bajo valor, por tal razón es necesario encontrar la manera de establecer un reajuste de este valor.

Figura 4.24: Cálculo del valor del factor de potencia del motor Baldor

| E5.2.A5.2-MEDIDA DE VARIABLES ELECTRICAS, FISICAS Y MECANICAS | |
|--|--------------------|
| TAG | Motor trifasico M3 |
| No FASES | 3 |
| CONFIGURACION DE DEVANADOS | Δ |
| MEDIDA DE LA TENSION ELECTRICA | |
| CONFIGURACION DE MEDIDA | Voltaje de Linea |
| VOLTAJE DE LINEA 1 [V] | 195 |
| VOLTAJE DE LINEA 2 [V] | 195 |
| VOLTAJE DE LINEA 3 [V] | 195 |
| VOLTAJE DE LINEA PROMEDIO [V] | 195 |
| VOLTAJE DE LINEA [V] | 195 |
| MEDIDA DE LA CORRIENTE ELECTRICA | |
| CONFIGURACION DE MEDIDA | Corriente de Linea |
| CORRIENTE DE LINEA 1 [A] | 1,7 |
| CORRIENTE DE LINEA 2 [A] | 1,7 |
| CORRIENTE DE LINEA 3 [A] | 1,7 |
| CORRIENTE DE LINEA PROMEDIO [A] | 1,7 |
| CORRIENTE DE LINEA [A] | 1,7 |
| MEDIDA DE LA POTENCIA ACTIVA | |
| POTENCIA ACTIVA A-N [W] | 124,3333 |
| POTENCIA ACTIVA B-N [W] | 124,3333 |
| POTENCIA ACTIVA C-N [W] | 124,3333 |
| POTENCIA ACTIVA TOTAL [W] | 372,9999 |
| DETERMINACION DEL FACTOR DE POTENCIA | |
| S (P Aparente) [VA] | 574,1748 |
| FP | 0,649627731 |

Fuente: Propia, mayo de 2018.

Variables físicas y mecánicas

Para el proceso de medición de las variables físicas y mecánicas, se obtuvieron los valores de la siguiente forma.

Medición de temperatura

Usando una termocupla se conectó su terminar a la carcasa del motor para tomar el valor de temperatura en grados centígrados, durante varios minutos esperando que el sistema llegara a condiciones estables (ver Figura 4.25).

Figura 4.25: Calculo de temperatura del motor funcionamiento nominal



Fuente: Propia, mayo de 2018.

Medición de velocidad de giro

La velocidad de giro del motor se obtuvo gracias a un transductor rotativo (Encoder incremental) que se encuentra acoplado al eje del motor y permite medir sus rpm (ver Figura 4.26). Los datos de velocidad de giro se tomaron desacoplando la correa que conecta al eje del motor y la caja reductora. Para que el equipo trabaje en condiciones nominales.

Figura 4.26: Medidor de revoluciones por minuto acoplado al eje del motor



Fuente: Propia, mayo de 2019

Los datos obtenidos de temperatura y velocidad se registraron en la herramienta “E5.2.A5.2-MEDIDA DE VARIABLES ELECTRICAS, FISICAS Y MECANICAS”, Figura 4.27.

Figura 4.27: Valores de temperatura en grados Celsius y RPM del motor en condiciones nominales.

| | |
|---|------|
| MEDIDA DE LA TEMPERATURA | |
| TEMPERATURA DE DEVANADOS [°C] | 83 |
| MEDIDA DEL PAR | |
| PAR MECANICO [N.m] | |
| MEDIDA DE LA VELOCIDAD DE ROTACION | |
| VELOCIDAD DE ROTACION [RPM] | 1650 |

Fuente: Propia, mayo de 2018.

De la recolección de estos valores se pudo concluir que el motor presenta sobrecalentamiento, y que las RPM a las que gira en condiciones nominales, están muy por debajo de las especificadas en la placa, las cuales son 1782 RPM. Esto aunado a lo del bajo factor de potencia hallado, demuestra que es necesario implementar oportunidades de mejora para el motor Baldor.

4.2.2.1.2. Motor de inducción trifásico del EMDS de la planta conversión de giro y frecuencia.

El proceso de medición y toma de datos del motor síncrono LabVolt (ver Figura 4.15), se desarrolló de forma diferente al efectuado en el motor Baldor, ya que como se dijo anteriormente, la planta de conversión de giro y frecuencia se encuentra configurada sobre un banco de pruebas para motores eléctricos; lo que facilitó el proceso de medición y recopilación de datos (ver Anexo F).

Se registraron los de placa del motor en la herramienta digital de recolección tal (ver Figura 4.28).

Figura 4.28: Censo de carga con valores de placa de los equipos que conforman el EMDS de las plantas auditadas

| CENSO DE CARGA | | | | | | | | | | | | |
|----------------------------|--------|---------------|----------------------|------------------------|---------------|-----------|--------------|------------|----------------|--------------------------|------------|------|
| MODULO DE CONTROL | MOT OI | TIPO DE MOTOR | NIVEL DE TENSION (V) | NIVEL DE CORRIENTE (I) | TIEMPO DE VID | VARIADOR? | POTENCIA (W) | EFICIENCIA | HORAS FUNCIONA | TRANSMISION CAJA O BANDA | % DE CARGA | RPM |
| Motor trifásico M3 | SI | ASINCRONO | 208 | 2 | | SI | 373 | 74 | | CAJA | | 1725 |
| Motor jaula de ardilla MC | SI | ASINCRONO | 208 | 1.2 | | NO | 175 | | | | | 1670 |
| Variador SIC1 | NO | | | | | | | | | | | |
| Motor de rotor devanado MG | SI | ASINCRONO | 208 | 1.3 | | SI | 175 | | | BANDA | | |
| Motor síncrono MM | SI | SINCRONO | 208 | 0.8 | | SI | 175 | | | BANDA | | 1800 |

Fuente: Propia, mayo de 2018.

Después de recoger la información de placa del equipo, se procedió a medir las variables eléctricas, mecánicas y físicas de este. Las mediciones fueron realizadas durante operación nominal del sistema, siguiendo los procedimientos internos de seguridad y las condiciones y prácticas mencionadas al inicio de esta sección.

Por otro lado, los equipos del banco de pruebas están dispuestos e interconectados de tal forma que permiten que la toma de datos se realice de manera simple. El proceso se llevó a cabo de la siguiente forma.

Variables eléctricas

Las variables eléctricas que se midieron en el sistema, fueron voltaje, corriente, potencia real y aparente. Dos medidores análogos, un voltímetro AC y un amperímetro AC, entrega los valores de voltaje y de corriente suministrados al motor por la fuente de alimentación trifásica (ver Figura 4.29).

Figura 4.29: Medidores de voltaje y corriente suministrada al motor.



Fuente: Propia, mayo de 2019.

De igual manera, un vatímetro análogo entrega los valores de potencia real consumida por el motor (ver Figura 4.30).

Figura 4.30: Vatímetro que mide la potencia real de suministro al motor.



Fuente: Propia, mayo de 2019.

Factor de potencia

Los datos de corriente, voltaje, y potencia real se registraron en la herramienta digital “E5.2.A5.2-MEDIDA DE VARIABLES ELECTRICAS, FISICAS Y MECANICAS”, la cual se encarga de calcular el factor de potencia (ver Figura 4.31). Como puede observarse en la Figura 4.31, el FP obtenido es superior a 0,8, lo que representa un valor correcto, que indica que el funcionamiento del motor.

Figura 4.31: Calculo del factor de potencia.

| MEDICIONES DIRECTAS DE VARIABLES ELECTRICAS, MECANICAS Y FISICAS | | |
|---|--------------------|--|
| TAG | | |
| No FASES | 3 | |
| CONFIGURACION DE DEVANADOS | Y | |
| MEDIDA DE LA TENSION ELECTRICA | | |
| CONFIGURACION DE MEDIDA | Voltaje de Linea | |
| VOLTAJE DE LINEA 1 [V] | 220 | |
| VOLTAJE DE LINEA 2 [V] | 220 | |
| VOLTAJE DE LINEA 3 [V] | 220 | |
| VOLTAJE DE LINEA PROMEDIO [V] | 220 | |
| VOLTAJE DE LINEA [V] | 220 | |
| MEDIDA DE LA CORRIENTE ELECTRICA | | |
| CONFIGURACION DE MEDIDA | Corriente de Linea | |
| CORRIENTE DE LINEA 1 [A] | 0,9 | |
| CORRIENTE DE LINEA 2 [A] | 0,9 | |
| CORRIENTE DE LINEA 3 [A] | 0,9 | |
| CORRIENTE DE LINEA PROMEDIO [A] | 0,9 | |
| CORRIENTE DE LINEA [A] | 0,9 | |
| MEDIDA DE LA POTENCIA ACTIVA | | |
| POTENCIA ACTIVA A-N [w] | 95 | |
| POTENCIA ACTIVA B-N [w] | 95 | |
| POTENCIA ACTIVA C-N [w] | 95 | |
| POTENCIA ACTIVA TOTAL [w] | 285 | |
| DETERMINACION DEL FACTOR DE POTENCIA | | |
| S (P Aparente) [VA] | 342,9461 | |
| FP | 0,831034478 | |

Fuente: Propia, mayo de 2019.

Variables físicas y mecánicas

Para este caso, se midieron la temperatura del devanado del motor y la velocidad de giro, desacoplando el motor de la carga y colocando a funcionar en condiciones nominales para poder medir las RPM.

Medición de temperatura

Usando una termocupla se accedió al devanado del motor y se tomó el valor de temperatura durante varios minutos, mientras el motor trabajaba en condiciones nominales del sistema (ver figura 4.32).

Figura 4.32: Medición de temperatura de los devanados del motor

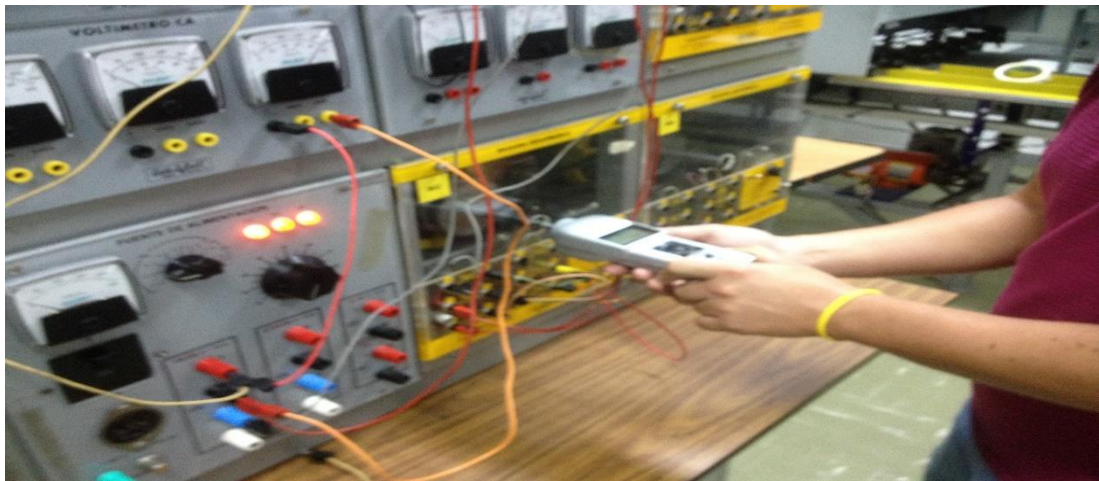


Fuente: Propia, mayo de 2019

Medición de velocidad de giro

Con ayuda de un tacómetro digital, se midió en el eje del motor, los valores correspondientes a las revoluciones por minuto de la máquina (ver figura 4.33).

Figura 4.33: Medición de las RPM del motor en condiciones nominales



Fuente: Propia, mayo de 2019

Para terminar, los valores registrados de rpm del motor en funcionamiento nominal, son muy similares a los aportados por la placa de este. Además, la temperatura medida del equipo cuando el sistema se encuentra funcionando a plena carga, no denota sobrecalentamiento, entorno a esto se concluye que el motor en condiciones nominales de trabajo presenta un correcto funcionamiento.

4.2.3. Toma de datos en el sistema de control de velocidad de las plantas de clasificación y conversión de giro y frecuencia

El método comúnmente usado para modular la velocidad de motores que accionen sistemas de proceso, es el uso de unidades de velocidad variable (VSD), a veces denominadas unidades de frecuencia variable (VFD) o inversores. Los variadores de velocidad son mecanismos electrónicos que permiten variar en forma continua la velocidad y el par de los motores asíncronos trifásicos, convirtiendo la frecuencia y tensión de la red en magnitudes variables. El uso de VFDs permite mejorar el rendimiento de los motores, ajustando su funcionamiento al par y velocidad que requiere la aplicación en cada momento (ver Anexo F). Las dos plantas de procesos seleccionadas cuentan con este tipo de equipos, para controlar la velocidad de los motores eléctricos que accionan el sistema.

4.2.3.1. Sistema de control de velocidad planta de clasificación

La planta de clasificación cuenta con un lazo de control de velocidad, que funciona fijando el valor de velocidad desde el HMI de la planta hacia el PLC; el cual mediante un módulo de PWM envía la señal un VFD marca Yaskawa J1000, quien ejecuta la acción correspondiente para modificar la velocidad del motor. Figura 4.34.

Figura 4.34: VFD que controla la velocidad de giro del motor Baldor



Fuente: Propia, mayo de 2019.

4.2.3.2. Sistema de control de velocidad de planta de variación de giro y de frecuencia

La planta de proceso de conversión de giro y frecuencia tiene dos modos de trabajo, uno automático y otro manual, en cualquiera de los dos modos, un variador de velocidad (ver Figura 4.35) es el encargado de controlar la velocidad del motor síncrono, el cual entrega la potencia mecánica al sistema.

Figura 4.35: VFD que controla la velocidad de giro del motor LabVolt



Fuente: Propia, mayo de 2019.

Como se mencionó anteriormente, la imposibilidad de contar con un instrumento de medida indispensable como lo es un analizador de redes, malogra la toma de datos, en los variadores de velocidad. Por cuestiones inherentes a su funcionamiento, los variadores de velocidad emiten armónicos hacia la red de suministro. Dichos armónicos deben estar dentro de determinados límites ya que conllevan daños hacia los equipos que se conectan a dicha red de suministro, por ejemplo, en los motores pueden sufrir sobrecalentamiento, emisión de ruido audible, corrientes armónicas en el roto, etc.

Debido a lo anterior se optó por realizar inspecciones visuales de todos los puntos de conexión del variador para ver si estaban flojos, corroídos o con vías de conducción a tierra. Y mediciones con el multímetro, para detectar conexiones que pudieran estar en circuito abierto generando cortos. Las inspecciones no arrojaron nada anormal, pero cabe resaltar que, las mediciones en un sistema de control de velocidad deben estar dirigidas a los armónicos y desequilibrios en voltaje y corriente que estos introducen a la red de suministro.

4.3. OPORTUNIDADES DE MEJORA EN LOS SISTEMAS AUDITADOS

Se identificaron varias oportunidades de mejora entorno al proceso de medición y toma de datos en los EMDS de las plantas de proceso auditadas. De manera similar a la sección anterior, las oportunidades de mejora se establecieron para los sistemas de transmisión, sistema motor simple, sistema de velocidad y sistema eléctrico (calidad de energía).

4.3.1. Planta de clasificación

4.3.1.1. Oportunidades de mejora en el sistema de transmisión

4.3.1.1.1. Transmisión por correa

Como ya se mencionó anteriormente, la planta clasificadora posee un sistema de poleas conectadas entre el motor, una caja reductora y uno de los ejes de los rodillos que mueven la banda (ver sección 4.2.2.1.1.). Las oportunidades de mejora entorno a este sistema van encaminadas al dimensionamiento adecuado de las correas; ya que, la mayor eficiencia de transmisión se logra cuando la carga está cerca de la capacidad de la correa. Es decir, si la correa es de menor tamaño, el deslizamiento de la correa sobre la polea resultará en altas pérdidas por fricción, mientras que, si la correa está sobredimensionada, la mayor rigidez de la correa también conducirá a mayores pérdidas por fricción.

Para finalizar, si bien la eficiencia de las transmisiones a través de correas trapezoidales depende de los factores antes mencionados o en otros casos de la relación de tamaño entre las poleas, generalmente estos elementos tienen una alta eficiencia del 95% al 98%, debido a su morfología y al material de que están hechas, que en un gran porcentaje es goma.

4.3.1.1.2. Transmisión por engranaje

Para transmitir el movimiento entre las bandas el sistema utiliza engranajes de pasta del tipo recto, de igual número de dientes. Estos tienen dientes paralelos al eje de rotación, en donde el engranaje impulsor gira en una dirección, mientras que el engranaje impulsado gira en la dirección opuesta (ver figura 4.9). Como propuesta de mejora se deben implementar engranajes helicoidales de metal sólido, estos son un refinamiento de los engranajes rectos, en donde los dientes no son paralelos al eje de rotación, sino que están colocados en ángulo. El ángulo de los dientes permite un acoplamiento gradual entre ellos, lo que resulta en una mejora de la eficiencia de transmisión entorno al 80%. Además, las pérdidas por fricción del engranaje debido al material utilizado se reducen notablemente.

Por otra parte, la caja reductora utilizada es la adecuada para el sistema, entorno a ella las oportunidades de mejora van encaminadas a un mantenimiento apropiado, como rutinas de limpieza y engrase del sistema de engranajes que la compone. Al igual que el reductor, dichas rutinas deben llevarse a cabo en las chumaceras que soportan los ejes de los rodillos, para disminuir las pérdidas por fricción.

4.3.1.2. Oportunidades de mejora en el sistema motor simple

4.3.1.2.1. Corrección del factor de potencia

Unas de las mejoras primordiales que se identificó para el motor Baldor, después del análisis de los diferentes datos que se le tomaron, fue una corrección en el factor de potencia, debido a que este valor se encuentra muy por debajo de lo recomendado (ver sección 4.2.3.1.1.). Por tal razón, se propone la implementación de un banco de condensadores que permita mejorar el factor de potencia actual de 0,65 a 0,8.

Los cálculos realizados para encontrar los valores de los condensadores para ajustar el factor de potencia tanto en configuración delta, como estrella se presentan a continuación:

4.3.1.2.2. Cálculo de las potencias con nuevo factor de potencia

A partir del nuevo valor del factor de potencia se encuentran las potencias del sistema:

$$FP = \cos \varphi = 0,8$$

$$\varphi = \cos^{-1}(0,8) = 36,87^\circ$$

Luego, la potencia aparente S para un valor en $FP = 0,8$ es:

$$S = \frac{P_{activa}}{FP} = \frac{373 \text{ W}}{0,8} = 466,25 \text{ VA}$$

Por tanto, la potencia reactiva Q será:

$$Q = S * \text{Sen } \varphi \quad (a)$$

$$Q = 466,25 * \text{Sen } (36,87^\circ) = 279,75 \text{ VAR}$$

Y la corriente de será:

$$I = \frac{S}{\sqrt{3} * V}$$

$$I = \frac{466,25 \text{ VA}}{\sqrt{3} * 195 \text{ V}} = 1,38 \text{ A}$$

4.3.1.2.3. Cálculo de potencia reactiva en el banco de condensadores

A partir de los datos medidos y los obtenidos mediante el ajuste al valor del factor de potencia se obtienen las potencias reactivas Q_1 y Q_2 . Esto mediante la ecuación (a).

La potencia reactiva actual del sistema es:

$$Q_1 = 436,37 \text{ VAR}$$

Y la potencia reactiva al reajuste será:

$$Q_2 = 279,75 \text{ VAR}$$

Por tanto, la potencia en el banco de condensadores será:

$$Q_{CT} = Q_1 - Q_2 = 156,62 \text{ VAR}$$

A continuación, se calcula la potencia reactiva en cada condensador:

$$Q_C = Q_{C1} = Q_{C2} = Q_{C3} = \frac{156,62}{3} \text{ VAR} = 52,2 \text{ VAR}$$

4.3.1.2.4. Cálculo de la capacidad de los condensadores en un banco con configuración delta

Como primer punto interesa conocer el valor del cálculo a través de cada condensador, que para este caso es igual al voltaje de línea:

$$V_C = V_L = 195 \text{ V}$$

A partir de los datos de potencia reactiva y voltaje en el condensador se obtiene la corriente que circula a través de este:

$$I_C = \frac{Q_C}{V_C} = \frac{52,2}{195} = 0,26 \text{ A}$$

Por tanto, la impedancia es:

$$X_C = \frac{V_C}{I_C} = \frac{195 \text{ V}}{0,26 \text{ A}} = 750 \Omega$$

Y el valor de la capacitancia de cada condensador es:

$$C = \frac{1}{2\pi * f * X_C} = \frac{1}{2\pi * 60 * 750 \Omega} = 3,53 \mu_F$$

Por tanto, el valor de las capacitancias de los condensadores en un banco con configuración delta es:

$$C_1 = C_2 = C_3 = 3,53 \mu_F$$

La ilustración del diagrama del banco de condensadores en configuración delta puede observarse en la figura (delta)

4.3.1.2.5. Cálculo de la capacidad de los condensadores en un banco con configuración estrella

Para este caso, El voltaje en el condensador teniendo que el banco está en configuración estrella es:

$$V_{Cf} = \frac{V_L}{\sqrt{3}} = \frac{195}{\sqrt{3}} = 112,58 V$$

Por tanto, la corriente a través del condensador es:

$$I_C = \frac{Q_C}{V_C} = \frac{52,2}{112,58} = 0,46 A$$

Una vez obtenidos los valores de voltaje y corriente en el condensador, se calcula el valor de la impedancia de este:

$$X_C = \frac{V_C}{I_C} = \frac{112,58 V}{0,46} = 244,73 \Omega$$

Y por último su capacitancia:

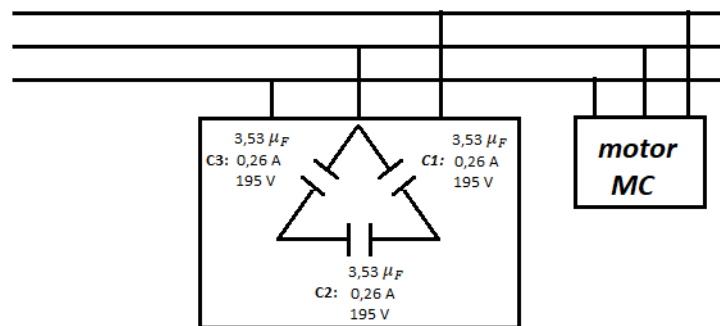
$$C = \frac{1}{2\pi * f * X_C} = \frac{1}{2\pi * 60 * 244,73 \Omega} = 10,83 \mu_F$$

Por tanto, el valor de las capacitancias en los condensadores en un banco con configuración estrella es:

$$C_1 = C_2 = C_3 = 10,83 \mu_F$$

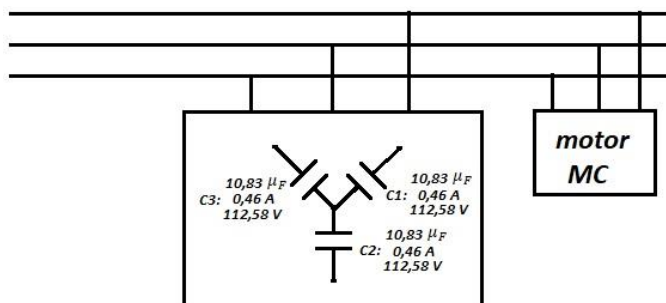
La ilustración del diagrama del banco de condensadores en configuración estrella y delta puede observarse en las figuras 4.36 y 4.37.

Figura 4.36: Banco de condensadores en conexión delta



Fuente: Propia, mayo de 2019

Figura 4.37: Banco de condensadores en conexión estrella



Fuente: Propia, mayo de 2019.

Por otro lado, a pesar de las dificultades que se presentaron, al no tener la instrumentación necesaria para obtener los datos que permitieran un mejor análisis de los sistemas auditados. Se pudieron identificar algunas oportunidades de mejora, observando la naturaleza y dinámica del sistema y de los elementos que lo componen, de la siguiente manera:

- ✓ Es necesario un dimensionamiento adecuado del motor, debido al bajo factor de potencia encontrado, esto indica que el motor se encuentra sobredimensionado o que está trabajando en malas condiciones debido al tiempo de vida que tiene. Para este caso se debe utilizar el motor apropiado, teniendo en cuenta las características nominales de funcionamiento (frecuencia, potencia, par de arranque etc.), las recomendaciones del fabricante, sugerencias tecnológicas, la carga de arrastre y el lugar o contexto en donde va a ser instalado.
- ✓ Para las variaciones en la carga que presenta el sistema durante su funcionamiento, es necesario implementar en este, mejoras tecnológicas como troceadores de tensión, los cuales proporcionan la energía necesaria, realizando adaptación ante el cambio del par del voltaje y la corriente.
- ✓ Implementación de mejoras tecnológicas como Inswitch o arrancadores suaves, en respuesta a los inconvenientes que genera el arranque del motor en el sistema eléctrico y en especial, el alto consumo representado por el aumento de la corriente de arranque.
- ✓ Lubricación y limpieza de los rodamientos y/o cojinetes del motor, debido a la presencia de vibración o alta temperatura del equipo durante su funcionamiento.

4.3.2. Planta de conversión de giro y frecuencia

4.3.2.1. Oportunidades de mejora en el sistema de transmisión

4.3.2.1.1. Transmisión por correa

La planta de conversión de giro y frecuencia implementa un sistema de poleas conectadas a los ejes de cada motor, las cuales permiten transmitir la potencia mecánica de un motor a otro, a través de una correa plana con estrías (ver figura 4.13). Para este caso, las oportunidades de mejora van encaminadas al cambio de la relación de tamaño de las poleas, ya que el sistema presenta una relación 1:1; si esta relación se cambia por ejemplo por una relación 1:2 o 1:3, la eficiencia de transmisión mejoraría, ya que se reducirían en gran porcentaje las pérdidas por fricción.

4.3.2.2. Oportunidades de mejora en el sistema eléctrico.

Dado que el motor que comanda el EMDS de la planta conversión de giro y frecuencia, en general presenta un funcionamiento correcto, las oportunidades de mejora se plantearon en relación al sistema eléctrico, que se encarga de suministrar la potencia eléctrica al proceso. Si se dispone de un analizador de redes y se comprueban desbalances de voltaje o corriente en el sistema de suministro se debe:

- ✓ Mejorar el bajo nivel de tensión a través de ajustes de *taps* de los transformadores, e instalación de cambiadores automáticos de *taps*, para la variación de cargas que influyen en el sistema).
- ✓ Mejorar la distorsión armónica producida por la presencia de cargas no lineales (como VFD, rectificadores, reguladores de voltaje, etc.), transformadores o cargas de impedancia variable. Se deben utilizar convertidores trifásicos de más de 6 pulsos, instalar filtros resonantes y filtros activos, reactancias de línea a la entrada de los convertidores, instalación de filtros pasivos (impedancias anti-armónicas), transformadores de aislamiento, etc.
- ✓ Mejorar el factor de potencia, utilizando un banco de condensadores automático para compensar el desfase entre las ondas de tensión y corriente.
- ✓ Implementar un sistema de protección de circuitos para disminuir la probabilidad de daños, inactividad, reparación o compra de equipos y maquinaria presupuestado.

4.4. EVALUACIÓN DE OPORTUNIDADES DE MEJORA.

El proceso de ejecución del método de auditoría propuesto MAEM, ha permitido conocer de manera profunda la dinámica y funcionamiento de los procesos realizados en el laboratorio auditado. Pero debido a que la naturaleza del sitio como ya se ha explicado a lo largo de este documento, no es la de un entorno típicamente industrial; surgen vacíos a la hora de implementar soluciones a largo plazo. Por ejemplo, se han presentado restricciones que imposibilitan llevar a cabo un estudio a largo plazo en los procesos auditados, ya que, conocer la dinámica de su funcionamiento se hace difícil (horas de funcionamiento, paradas, practicas operacionales, etc.). Por lo que adoptar soluciones de mejora sin tener en claro si en una línea de tiempo van a resultar, es un desperdicio económico.

En un entorno típicamente industrial, las oportunidades de mejora implican la compra de equipo, materiales y realización de trabajos adicionales, se debe calcular el costo de la inversión correspondiente, para cada uno de los sistemas auditados. Para el cálculo de la inversión en mejoras, se deben tener en cuenta todos los costos que implica llevar a cabo dichas propuestas de mejora; es decir realizar un desglose de los equipos por comprar, el valor de la instalación de instrumentación o la mano de obra requerida.

También es necesario realizar un análisis de la tasa de retorno, de la inversión realizada para llevar a cabo las oportunidades de mejora. El cálculo del período simple de retorno de la inversión se realiza de la siguiente manera:

$$PRI = \frac{MIA}{AEI}$$

Donde:

PRI: Período de recuperación de la inversión en años.

MIA: Monto de la inversión necesaria para la aplicación de la propuesta de mejora (\$).

AEI: Ahorro económico anual que se obtendrá con la implementación de la propuesta de mejora (\$/año).

El formato sugerido para concentrar y mostrar los potenciales de ahorro de energía se presenta en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2: Formato de registro para potenciales de ahorro de energía

| Descripción de la mejora propuesta | Costo de la inversión | Tasa de retorno (años) |
|------------------------------------|-----------------------|------------------------|
| | | |

Fuente: Propia, mayo de 2019.

- **Valor presente Neto (VPN)**

Llegado el momento en que las soluciones presentadas a la organización requieran de la implementación de proyectos, que implican la reconstrucción de las líneas de operación mediante la sustitución de maquinaria, es imprescindible establecer la evaluación de tales proyectos mediante la utilización de estrategias financieras que den a conocer qué viabilidad representa la ejecución de estos proyectos, y además escoger sobre un listado de alternativas posibles cual implementación es la mejor.

Para llevar a cabo el desarrollo de estos proyectos, se aplica el valor presente neto (VPN) a cada uno de ellos, con el fin valorar la viabilidad de cada posible implementación y así determinar cuál es la solución que mejor conviene adoptar en la empresa. En cuanto a los resultados obtenidos se tiene que las implementaciones a adoptar son aquellas cuyo VPN es mayor a cero (0), y en el caso de encontrarse más de una con esta característica, la más viable será aquella con el valor de VPN más grande

El valor del VPN se obtiene resolviendo la siguiente sumatoria:

$$VPN : -I_o + \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1+k)^t} = -I_o + \frac{F_1}{(1+k)^1} + \frac{F_2}{(1+k)^2} + \dots + \frac{F_n}{(1+k)^n}$$

donde

I_o : *inversión inicial*, es decir el costo del equipo o maquinaria a obtener.

F_t : *flujos netos de efectivo*, que corresponde a las ganancias o pérdidas económicas que surgen de la implementación del proyecto a través del tiempo.

k : *tasa de descuento*, también denominada tasa de expectativa o alternativa/oportunidad, es una medida de la rentabilidad mínima exigida por el proyecto que permite recuperar la inversión, cubrir los costos y obtener beneficios

n : *plazo de periodo o vida útil*.

Por tanto, para efectuar el cambio de motores o elementos asociados a estos, deben estudiarse y establecerse, cuáles son los flujos representados en valores de ahorros o ganancias económicas obtenidos tras la puesta en marcha del motor en la línea. Para el trabajo actual en desarrollo, se ha encontrado que no es posible determinar los flujos económicos cuantificados, debido a la falta de información presentada.

Ejemplo:

Una empresa planea comprar una máquina para implementar en uno de sus procesos, para esto tiene un catálogo que le presenta 2 posibles equipos que son las maquinas Tipo A y Tipo B. Los costos de inversión de cada una, La ganancia

anual de operación, el valor de salvamento y el periodo de vida se presentan en la tabla 4.3. De acuerdo con las características presentadas, se planea calcular el valor presente neto de cada una, para determinar cuál es la mejor opción de compra.

Tabla 4.3: Características de evaluación económica en las maquinas A y B

| MAQUINA | Tipo A | Tipo B |
|----------------------------------|---------------|---------------|
| Inversión Inicial | 2'500.000 | 3'500.000 |
| Ganancia anual de operación | 700.000 | 900.000 |
| Valor de salvamento | 200.000 | 350.000 |
| Vida en años | 5 | 5 |
| Usar un costo de capital del 10% | | |

Se calcula el VPN de la maquina tipo A:

$$VPN : -2'500.000 + \frac{700.000}{(1+0,1)^1} + \frac{700.000}{(1+0,1)^2} + \frac{700.000}{(1+0,1)^3} + \frac{700.000}{(1+0,1)^4} + \frac{700.000}{(1+0,1)^5} + \frac{200.000}{(1+0,1)^5}$$

$$VPN_A : \$ 277.735,00$$

Se calcula el VPN de la maquina tipo B:

$$VPN : -3'500.000 + \frac{900.000}{(1+0,1)^1} + \frac{900.000}{(1+0,1)^2} + \frac{900.000}{(1+0,1)^3} + \frac{900.000}{(1+0,1)^4} + \frac{900.000}{(1+0,1)^5} + \frac{350.000}{(1+0,1)^5}$$

$$VPN_B : \$ 129.030,56$$

Los valores obtenidos en el VPN sugieren que la mejor opción a implementar es la máquina tipo A.

- **Tasa Interna de Retorno (TIR)**

Como herramienta de complemento para evaluar la implementación de los proyectos que buscan sustituir alguno de los motores diagnosticados en la auditoria, se tiene la Tasa Interna de Retorno (TIR), que brinda criterios a partir de la medición del rendimiento de los fondos que se pretenden invertir.

En el sentido del análisis de sensibilidad del proyecto, el criterio de TIR muestra la sensibilidad del VPN, ya que, mediante esta, se conoce cuál es la tasa de interés mayor que la organización puede pagar para llevar a cabo los proyectos formulados, sin perder dinero. Por tanto, se obtiene el valor de la TIR para conocer cuál es la tasa de interés máxima que la universidad debe adoptar para asegurar que el

proyecto para la sustitución de la maquinaria en las plantas auditadas sea rentable y no represente pérdidas económicas.

El cálculo de la TIR se realiza mediante la ecuación de cálculo de VPN igualada a cero:

$$VPN : -I_o + \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1 + TIR)^t} = -I_o + \frac{F_1}{(1 + TIR)^1} + \frac{F_2}{(1 + TIR)^2} + \dots + \frac{F_n}{(1 + TIR)^n} = 0$$

Donde

I_o : inversión inicial

F_t : flujos netos de efectivo

n : número de periodos de tiempo

De la misma manera que en el caso anterior debido a que no se cuenta con un proyecto que contenga los datos necesarios para la ejecución de esta estrategia, La herramienta se plantea como recomendación de implementación, para dichos proyectos.

Ejemplo:

Se calcula la TIR a partir del Valor Presente Neto encontrado para la maquina tipo A cuyas características están en la Tabla 4.3

$$0 = -2'500.000 + \frac{700.000}{(1 + TIR)^1} + \frac{700.000}{(1 + TIR)^2} + \frac{700.000}{(1 + TIR)^3} + \frac{700.000}{(1 + TIR)^4} + \frac{700.000}{(1 + TIR)^5} + \frac{200.000}{(1 + TIR)^5}$$

$$TIR = 0,141 = 14,1\%$$

Se tienen entonces que el valor de la TIR = 14,1% es mayor al valor de la tasa de descuento que es del 10%, por tanto, se tienen que la tasa de rendimiento interno es superior a la mínima exigida se, concluye por tanto que el proyecto es rentable.

CAPITULO 5

5. Conclusiones y trabajos futuros

5.1. Conclusiones.

El método de auditoría energética (MAEM), desarrollado en el presente trabajo, funciona como un instrumento que permite ejecutar auditorías de energía en organizaciones industriales que contienen sistemas impulsados por motores eléctricos en sus unidades de producción. Fundamentado en la norma internacional ISO 50002:2014, con MAEM se logra superar la barrera de la heterogeneidad que se presenta cuando las organizaciones pretenden llevar a cabo auditorías energéticas en sus instalaciones a partir de diferentes metodologías cuyos procedimientos pueden diferir entre sí; esto debido a que el método propuesto consigue albergar en un solo conjunto modelado conforme la estructura de ISO 50002:2014, los requerimientos presentados en los diferentes procedimientos a la hora de llevar a cabo auditorías energéticas en motores eléctricos.

A causa del incremento progresivo del consumo energético, en conjunto con el alza de los costos de la energía y la reducción de los recursos naturales; en las organizaciones industriales han germinado sistemas de gestión de energía, que, mediante el estudio de la eficiencia energética en las unidades, buscan optimizar el uso de la energía dentro de los procesos productivos. El papel que juega la eficiencia energética respecto a la toma de decisiones de la organización es fundamental, ya que de ella dependen los beneficios económicos u productivos de estas. Además, mediante el conocimiento del uso y el consumo de energía presentado en cada unidad de proceso, se logra determinar cuál es el rendimiento de estas y que posibilidades de ahorro o mejora existe.

Ya que durante la ejecución de una auditoría energética se requiere del levantamiento y procesamiento de cantidades significativas de información, es de gran importancia que el auditor tenga herramientas de las que pueda disponer al momento de llevar a cabo la recogida de los datos, de tal manera que la obtención y el procesamiento de la información en la auditoría pueda llevarse a cabo en cantidades más cortas de tiempo, lo que garantiza que se agilicen también los tiempos de ejecución de la auditoría. Por esto, como herramienta de ejecución del MAEM, se han desarrollado formatos de recolección digital, para ser manipulados por el auditor en aquellas etapas en las que se requiere el registro de información, que permita al auditor realizar un reconocimiento de los activos físicos del sitio auditado, así como el procesamiento de datos que resulta de la verificación de las condiciones de funcionamiento de dichos elementos dentro de la organización.

5.2. Trabajos futuros

Los procesos industriales son impulsados por una variedad de formas de energía, tales como electricidad, calor, vapor, etc. Esta variedad de formas de energía representa un problema a la hora de abordar la ejecución de un proceso de auditoría energética, ya que las empresas para llevar a cabo sus procesos usan una, dos o más de tres de estas formas de energía. Por tal razón, se recomienda desarrollar trabajos en los cuales se busquen establecer procedimientos unificados tomando como base la estructura de la norma ISO 50002, para llevar a cabo auditorías energéticas enfocadas al diagnóstico, que abarquen una forma de energía en común, en aras de especializar los procedimientos de auditoría energética.

BIBLIOGRAFIA

- [1] World Energy Council, "World Energy Trilemma Index," p. 158, 2018. [Online]. Available: <https://bit.ly/2V80WUQ>
- [2] E. J. Hobsbawm, *Industry and empire: From 1750 to the present day*. New York: The New Press, 1999. [Online]. Available: https://books.google.com.co/books/about/Industry_and_Empire.html?id=WP_RaJIK5LNoC&redir_esc=y
- [3] E. J. Hobsbawm, *The Age of Revolution: Europe 1789–1848*. Reino Unido: Vintage books, 1996, pp. 27-52. [Online]. Available: <https://www.amazon.com/Age-Revolution-1789-1848-Eric-Hobsbawm/dp/0679772537>
- [4] D. Yergin, *The Prize: The Epic Quest for Oil, Money & Power*. Estados Unidos: Schuster & Simon, 2011, pp. 27-52, pp. 371-635. [Online]. Available: https://books.google.com.co/books/about/The_Prize.html?id=WiUTwBTux2oC&redir_esc=y
- [5] International Energy Agency, "World Energy Balances: Overview (2017 edition)," pp. 21, 2017. [Online]. Available: <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/WorldEnergyBalances2017Overview.pdf>
- [6] R. Scott, *The History of the International Energy Agency: The First 20 Years Origins and Structure*, Vol. 1, OECD Librería, 2004, pp. 19-58. [Online]. Available: https://www.oecd-ilibrary.org/energy/the-history-of-the-international-energy-agency-the-first-20-years_9789264020931-en
- [7] EIA, "U.S Energy Information Administration," 2018. [Online]. Available: <https://www.eia.gov/about/>
- [8] Internacional Energy Agency, "World Energy Outlook-2017," p. 33–61, 2017. [Online]. Available: http://www.iea.org/media/weowebiste/2017/Chap1_WEO2017.pdf
- [9] U. S Energy Information Administration, "International Energy Outlook 2017," 2017. [Online]. Available: [https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484\(2017\).pdf](https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484(2017).pdf)
- [10] International Energy Agency, "Key World Energy Statistics 2017," p. 97, 2017. [Online]. Available: <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyWorld2017.pdf>
- [11] Ministerio de Minas y Energía de Colombia y Unidad de Planeación Minero-Energética - UPME, "Plan De Acción Indicativo De Eficiencia Energética 2017 - 2022," pp. 1-157, 2017. [Online]. Available:

http://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/MarcoNormatividad/PAI_PR_OURE_2017-2022.pdf

- [12] P. Waide and C. U. Brunner, "Energy-Efficiency Policy Opportunities for Electric Motor-Driven Systems," *Int. energy agency*, vol. na, no. na, p. 132, 2011. [Online]. Available: https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/EE_for_ElectricSystems.pdf
- [13] Ministerio de Minas y Energía de Colombia y Unidad de Planeación Minero-Energética - UPME, Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación - Colciencias, "Determinación Del Potencial De Reducción Del Consumo Energético En Los Subsectores Manufactureros Códigos Ciiu 10 A 18 En Colombia," pp. 103-208, 2014. [Online]. Available: http://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/INFORME_III_Caracterizacion_energetica_VerPub.pdf
- [14] P. Walde, and C. Brunner, "Energy-Efficiency Policy Opportunities for Electric Motor-Driven Systems, *IEA Energy Papers*, International energy agency – OECD/IEA, France, 2011. [Online]. Available: https://www.oecd-ilibrary.org/energy/energy-efficiency-policy-opportunities-for-electric-motor-driven-systems_5kqg52qb9gid-en
- [15] A. C. on N. E. E. P. (ACNEEP), "The History of Energy Efficiency," no. January, pp. 1–45, 2013. [Online]. Available: http://www.ase.org/sites/ase.org/files/resources/Media%20browser/ee_com_mission_history_report_2-1-13.pdf
- [16] W. C. Turner and S. Doty, *Energy Management Handbook*. Fairmont Press, Ed. Sixth 2007. [Online]. Available: <https://www.amazon.es/Energy-Management-Handbook-Sixth-Steve/dp/0849382343>
- [17] International Organization for Standardization, "ISO 50001:2011 (es). Sistemas de gestión de la energía — Requisitos con orientación para su uso," 2011. [Online]. Available: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:50001:ed-1:v1:es:term:3.7>.
- [18] X. Xia and L. Zhang, "Industrial energy systems in view of energy efficiency and operation control," *Annu. Rev. Control*, vol. 42, pp. 299–308, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2016.09.009>
- [19] M. G. Patterson, "What is energy efficiency? Concepts, indicators and methodological issues," *Energy Policy*, vol. 24, no. 5, pp. 377–390, 1996. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1016/0301-4215\(96\)00017-1](https://doi.org/10.1016/0301-4215(96)00017-1)
- [20] International Energy Agency, "Energy Access Outlook 2017: From poverty to prosperity," *Energy Procedia*, vol. 94, no. March, p. 144, 2017. [Online]. Available:

https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/WEO2017SpecialReport_EnergyAccessOutlook.pdf

- [21] International Organization for Standardization, "ISO 50002:2014. Energy Audits - Requirements with guidance for use," p. 34, 2014. [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/60088.html>
- [22] Document Slide, "Familia Normas ISO 50000 | Energy Management," 2017. [Online]. Available: https://documentslide.org/the-philosophy-of-money.html?utm_source=familia-normas-iso-50000-energy-management
- [23] I. American National Standards Institute, "A Management System for Energy," p. 47, 2008. [Online]. Available: <https://webstore.ansi.org/RecordDetail.aspx?sku=ANSI%2FMSE+2000%3A2008>
- [24] ISO, "ISO 50001 - Energy management," 2018. [Online]. Available: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:50001:ed-2:v1:en>
- [25] A. Kluczek and P. Olszewski, "Energy audits in industrial processes," *J. Clean. Prod.*, vol. 142, no. 4 pp. 3437-3453, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.123>
- [26] E. A. Abdelaziz, R. Saidur, and S. Mekhilef, "A review on energy saving strategies in industrial sector," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 1, pp. 150–168, 2011. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.09.003>
- [27] R. Saidur, "A review on electrical motors energy use and energy savings," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, no. 3, pp. 877-898, 2010. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.10.018>
- [28] International Organization for Standardization, "ISO 50003:2014. Energy management systems -- Requirements for bodies providing audit and certification of energy management systems," ISO/TC 301 Energy management and energy savings, p. 18, 2014. [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/60089.html>
- [29] International Organization for Standardization, "ISO 50004:2014. Energy management systems -- Guidance for the implementation, maintenance and improvement of an energy management system," ISO/TC 301 Energy management and energy savings, p. 42, 2014. [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/60041.html>
- [30] International Organization for Standardization, "ISO 50015:2014. Energy management systems -- Measurement and verification of energy performance of organizations -- General principles and guidance," ISO/TC 301 Energy management and energy savings, p. 19, 2014. [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/60043.html>

- [31] AENOR, “UNE-EN 16247-1: 2012. Auditorías energéticas,” 2012. [Online]. Available: <https://www.aenor.com/normas-y-libros/buscador-de-normas/une/?c=N0050414>
- [32] T. Sun, D. Chan, and C. Y. Hung, G. B. Hong, “The status of energy conservation in Taiwan's cement industry,” *Energy Police*, vol. 60, pp. 481-486, 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.04.002>
- [33] S. Backlund, and P. Thollander, “Impact after three years of the Swedish energy audit program,” *Energy*, vol. 82, pp. 54-60, 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.12.068>
- [34] S. Paramonova, and P. Thollander, “Ex-post impact and process evaluation of the Swedish energy audit policy programme for small and medium-sized enterprises,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 135, pp. 932-949, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.139>
- [35] J. Harris, J. Anderson, and W. Shafron, “Investment in energy efficiency: a survey of Australian firms,” *Energy Police*, vol. 28, no. 12, pp. 867–876, 2000. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(00\)00075-6](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(00)00075-6)
- [36] S. Anderson, and R. Newell, “Information programs for technology adoption: the case of energy-efficiency audits,” *Resource and Energy Economics*, vol. 26, no. 1, pp. 27–50, 2004. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.reseneeco.2003.07.001>
- [37] T. Schudeleit, S. Züst, and K. Wegener, “Methods for evaluation of energy efficiency of machine tools,” *Energy*, vol. 93, Part. 2, pp. 1964-1970, 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.10.074>
- [38] R. Lanzzarín, and M. Noro, “Energy efficiency opportunities in the production process of cast iron foundries: An experience in Italy,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 90, pp. 509-520, 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.07.028>
- [39] A. Aranda-Usón, G. Ferreira, M. mainar-Toledo, S. Scarpellini, and E. Sastresa, “Energy consumption analysis of Spanish food and drink, textile, chemical and non-metallic mineral products sectors,” *Energy*, vol. 42, no. 1, pp. 477-485, 2012. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.03.021>
- [40] J. Fresner, F. Morea, C. Krenn, J. Usón, and F. Tomasi, “Energy efficiency in small and medium enterprises: Lessons learned from 280 energy audits across Europe,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 142, Part. 4, pp. 1650-1660, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.126>
- [41] N. Tanasić, G. Jankes, M. Stameniće, A. Nikolić, M. Trninić, and T. Simonović, “Potentials for reducing primary energy consumption through energy audit in the packaging paper factory,” *3rd International Symposium on Environmental*

- Friendly Energies and Applications (EFEA)*, Conference, 19-21 November 2014, St. Ouen, France. [Online]. Available: [10.1109/EFEA.2014.7059957](https://doi.org/10.1109/EFEA.2014.7059957)
- [42] A. Boharb, A. Allouhi, R. Saidur, T. Kousksou, and A. Jamil “Energy conservation potential of an energy audit within the pulp and paper industry in Morocco,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 149, pp. 569–581, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.090>
- [43] M. Prashanth, R. Eshwar, V. Patel, J. Selvaraj, R. Rohit, R. Rahul, and G. Menon “A Multi Faceted Approach To Energy Conservation In Foundries,” *Procedia Engineering*, vol. 97, pp. 1815–1824, 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.335>
- [44] G. Aadithya, “Application of energy value stream mapping as auditing tool for non-value added industrial energy management,” *2016 3rd International Conference on Electrical Energy Systems (ICEES)*, Conference, 17-19 March 2016, Chennai, India. [Online]. Available: [10.1109/ICEES.2016.7510617](https://doi.org/10.1109/ICEES.2016.7510617)
- [45] S. Rajput, and O. Singh, “Energy audit in textile industry: A study with ring frame motor,” *2016 International Conference on Control, Computing, Communication and Materials (ICCCCM)*, Conference, October 2016, Allahbad, India. [Online]. Available: [10.1109/ICCCCM.2016.7918234](https://doi.org/10.1109/ICCCCM.2016.7918234)
- [46] C. M. Man, M. H. Chen, and G. B. Hong, “Energy conservation status in Taiwanese food industry,” *Energy Police*, vol. 50, no. 12, pp. 458–463, 2012. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.07.043>
- [47] M. Stamenić, G. Jankes, N. Tanasić, M. Trninić, and T. Simonović, “Energy audit as a tool for improving overall energy efficiency in Serbian industrial sector,” *2012 2nd International Symposium On Environment Friendly Energies And Applications*, Conference, 25-27 June 2012, Newcastle upon Tyne, UK. [Online]. Available: [10.1109/EFEA.2012.6294075](https://doi.org/10.1109/EFEA.2012.6294075)
- [48] AENOR, “UNE-EN 16247-3. Auditorías energéticas parte 3: Procesos,” 2014. [online]. Available: <https://bit.ly/2UTZEwf>
- [49] Comunidad de madrid – Consejería de economía y hacienda, “Dirección General de Industria Energía y Minas., *Procedimiento de auditorías energéticas en el sector industrial de la Comunidad de Madrid*,” Dirección general de industria energía y minas, 2011, [Online]. Available: <https://bit.ly/2CCHxnv>
- [50] Ernesto Budia Sánchez, “Modelo de Auditoria Energetica en el Sector Industrial,” Universidad Carlos III de Madrid, 2009.
- [51] International Energy Agency - Energy Equipment Efficient End-Use, “*Energy Audit Guide for Motor Driven Systems*,” 2018, [Online]. Available: <https://bit.ly/2U3aO5y>

- [52] Office of Industrial Technologies, “*Energy Management for Motor Driven Systems*,” Washington: U.S. Department of Energy, 2000, [Online]. Available: <https://bit.ly/2upL83L>
- [53] Elizabeth Vintimilla, Paul paladines, “Auditoria eléctrica a la fabrica de cartones nacionales cartopel,” Universidad Politécnica Salesiana, 2012.
- [54] A. Hasanbeigi and L. Price, “*Industrial Energy Audit Guidebook: Guidelines for Conducting an Energy Audit in Industrial Facilities*”, October, 2010. [Online]. Available: <https://bit.ly/2UdaHDx>
- [55] E. Allouhi, A. Boharb, R. Saidur, T. Kousksou, and A. Jamil, “Comprehensive Energy Systems: 5.1 Energy Auditing,” Vol. 5, pp. 1-44, 2018. [Online]. Available: <https://bit.ly/2Whp6fq>
- [56] SCEM, “*Reference Manual for Motor Driven Systems*,” 2018, [Online]. Available: <https://bit.ly/2FH5LyV>
- [57] Juan Caicedo, Vladimir Tobar, “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,” Universidad del Cauca, 2016.
- [58] Alvaro Chasqui, Juan Perlaza, “Propuesta de eficiencia energética del sistema de transporte neumático de la empresa alimenticia el cocinerito. caso de estudio,” Universidad del Cauca, 2017.
- [59] Maria Garcia, “Estudio del potencial de ahorro eléctrico en el sector de santo domingo de la universidad del cauca,” Universidad del Cauca, 2014.
- [60] FLUKE, “*Analizador de calidad eléctrica y motores Fluke 438-II*,” 2017. [Online]. Available: <https://bit.ly/2W12L5d>