

**PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA PARA EL AHORRO DE ENERGÍA  
ELÉCTRICA EN EL PROCESO DE FORMACIÓN EN UNA FÁBRICA  
DE BATERÍAS**

**ING. ELIANA MARÍA NORIEGA ANGARITA**



**UNIVERSIDAD DE LA COSTA  
DEPARTAMENTO DE ENERGÍA  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA  
BARRANQUILLA,  
COLOMBIA  
23 DE FEBRERO DE 2018**

**PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA PARA EL AHORRO DE ENERGÍA  
ELÉCTRICA EN EL PROCESO DE FORMACIÓN EN UNA FÁBRICA  
DE BATERÍAS**

**ING. ELIANA MARÍA NORIEGA  
ANGARITA**

**Trabajo de Grado presentado para optar al título de  
Magíster en Ingeniería con énfasis en Ingeniería  
Industrial**

**TUTOR: PhD. JUAN JOSÉ CABELLO ERAS  
CO-TUTOR: PhD. HERNÁN HERNANDEZ HERRERA**

**UNIVERSIDAD DE LA COSTA  
DEPARTAMENTO DE ENERGÍA  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA  
BARRANQUILLA,  
COLOMBIA  
23 DE FEBRERO DE 2018**

NOTA DE ACEPTACIÓN

---

---

---

---

---

JURADO

---

JURADO

---

---

Barranquilla, 23 de febrero de 2018

### **Agradecimientos**

Quisiera dejar plasmado en este documento primeramente dándole gracias a Dios por la por la vida que me ha dado, por darme la oportunidad de seguir estudiando, por llenarme de mucha sabiduría y fortaleza para poder llevar adelante todo lo propuesto; la honra y la gloria sea para Dios.

Doy gracias a mis tutores PhD. Juan Cabello Eras y PhD. Hernán Hernández Herrera. Gracias por su paciencia, dedicación, motivación y criterio. Gracias porque ustedes fueron protagonistas de esta etapa de mi vida, gracias por tener siempre esa disposición por enseñarme y guiarme.

Gracias a mi familia por soportar en muchas ocasiones mi ausencia, a mi madre que siempre estuvo ahí para darme ánimos, a mi esposo por ser el mejor compañero del mundo, por atender a mi hija mientras yo estudiaba y colaborar en este proceso, a mi hija que es el centro de mi vida y una de las razones de seguir adelante para brindarle un mejor futuro y a toda mi familia porque en muchas ocasiones no estuve con ellos en momentos especiales. Gracias a todos aquellos que tal vez en este momento no logro recordar pero que de una u otra manera hicieron un aporte a esta etapa de mi vida.

¡Gracias!

## Contenido

Agradecimientos.....	4
Contenido .....	5
Índice de tablas .....	7
Índice de figuras .....	9
Resumen .....	12
Abstract 13	
Introducción.....	14
1. Planteamiento del problema.....	16
2. Justificación .....	17
3. Objetivos.....	19
3.1 General.....	19
3.2 Específicos.....	19
4. Aspectos metodológicos .....	20
5. Capítulo 1: Estudio documental en la fabricación de baterías de plomo ácido y gestión de la energía aplicando la norma ISO 50001 .....	25
5.1. Generalidades sobre baterías eléctricas .....	25
5.2. Tipos de baterías de plomo ácido .....	28
5.3. Componentes de la batería de plomo ácido de arranque .....	29
5.4. Proceso de fabricación de las baterías de plomo ácido de arranque.....	31
5.5. Proceso de formación de las baterías de plomo ácido.....	33
5.5.1. Régimen de carga a tensión constante (CV).....	34
5.5.2. Régimen de carga a corriente constante (CI).....	35
5.5.3. Régimen de carga a corriente constante-tensión constante (CICV).....	37
5.5.4. Régimen de carga a corriente constante-tensión constante – tensión constante (CICVCV).....	38
5.5.5. Régimen de carga intermitente (IC).....	39
5.5.6. Régimen de carga interrumpida (ICC).....	41
5.6. Gestión de la Energía.....	44
5.7. ISO 50001 .....	45
5.7.1. Requisitos de un SGE.....	47
5.7.2. Eficiencia Energética en el proceso de formación de baterías .....	51
6. Capítulo 2: Materiales y métodos.....	54
6.1. Descripción de la instalación .....	54

6.2.	Metodología aplicada .....	54
6.3.	Tecnología utilizada .....	55
6.3.1.	Termografía.....	55
6.3.1.1.	Aplicaciones de la termografía.....	57
6.3.2.	Analizador de redes y pinza amperimétrica. ....	60
6.3.3.	Sensores Suaves .....	64
6.4.	Pruebas estadísticas y software utilizado .....	69
7.	Capítulo 3: Implementación de la metodología y análisis de los resultados .....	71
7.1.	Consumo de energía pasado y presente.....	71
7.2.	Identificación de las áreas con uso significativo de la energía.....	72
7.3.	Obtención de la línea base energética y la línea meta .....	74
7.4.	Construcción del Indicador para la UFB.....	82
7.5.	Identificación de los factores que afectan el consumo de la energía eléctrica en la UFB .....	89
7.5.1.	Calidad de la energía en la línea de suministro.....	90
7.5.1.1	Evaluación de la influencia del transformador a que están conectados los circuitos de formación. ....	90
7.5.1.2.	Variación de tensión.....	92
7.5.2.	Análisis de la influencia de factores asociados al personal de trabajo en el IEE del proceso de formación de baterías. ....	93
7.5.2.1.	Turno de trabajo. ....	93
7.5.2.2.	Evaluación de la influencia de la hora de inicio del proceso. ....	95
7.5.3.	Factores tecnológicos .....	98
7.5.3.1.	Estado técnico de los circuitos.....	98
7.5.3.1.1	Revisión energética en el área de formación de baterías.....	103
7.5.3.2.	Temperatura del proceso.....	117
7.5.3.2.	Nivel de tensión en el sistema de suministro. ....	117
7.6.	Oportunidades de ahorro en la UFB.....	120
7.7.	Implementación y evaluación.....	121
8.	Conclusiones.....	124
9.	Bibliografía.....	125
Anexos		134

**Índice de tablas**

Tabla 4.1 Matriz de actividades .....	22
Tabla 6.1 Especificaciones de la cámara termográfica Fluke 435Ti 200 .....	59
Tabla 6.2 Especificaciones del analizador de redes Fluke 435 II .....	61
Tabla 6.3 Especificaciones del analizador de redes Dranetz Power Visa.....	62
Tabla 6.4 Especificaciones de la pinza amperimétrica modelo ET-4080 .....	63
Tabla 7.1 Datos de producción de baterías y consumo de energía mensual en el período (2011-2014). .....	75
Tabla 7.2 Datos de producción de baterías y consumo de energía diaria en el mes de junio de 2015.....	78
Tabla 7.3 Consumo de energía en Ah durante la producción de las baterías con el respectivo factor kb. ....	80
Tabla 7.4 Datos de producción de baterías, batería equivalente y consumo de energía diaria en el mes de junio de 2015. ....	81
Tabla 7.5 Tipos de baterías y cantidad de procesos de formación para cada uno .....	83
Tabla 7.6 Datos nominales de los transformadores .....	90
Tabla 7.7 Resumen del análisis de comparación de medias según el transformador de alimentación.....	91
Tabla 7.8 ANOVA de la comparación de medias del IEE según el transformador de alimentación.....	92
Tabla 7.9 Resumen del análisis de comparación de medias según el turno de trabajo.....	94
Tabla 7.10 ANOVA de la comparación de medias del IEE por turno de trabajo.....	94

Tabla 7.11 Resultados de la prueba de comparación de múltiples rangos en los turnos de trabajo. (95 % de confianza) .....	95
Tabla 7.12 Resumen del análisis de comparación de medias según el horario de inicio del proceso. ....	96
Tabla 7.13 ANOVA de la comparación de medias del IEE por turno de trabajo.....	96
Tabla 7.14 Resultados de la prueba de comparación de múltiples rangos según el horario de inicio del proceso. (95 % de confianza) .....	97
Tabla 7.15 ANOVA de la comparación de medias del IEE por circuitos de formación. ....	99
Tabla 7.16 Circuitos de mejor desempeño según el IEE.....	99
Tabla 7.17 Circuitos de peor desempeño según el IEE. ....	100
Tabla 7.18 Resultados de la prueba de comparación de múltiples rangos en los circuitos seleccionados. (95 % de confianza).....	101
Tabla 7.19 Datos de los circuitos estudiados.....	103
Tabla 7.20 Diferencia de tensión, corriente y potencia en el circuito 175.....	105
Tabla 7.21 Potencia consumida y pérdidas en los circuitos. ....	106
Tabla 7.22 Pérdidas de los conductores circuito 175. ....	107
Tabla 7.23 Registros de temperatura en las mesas de los circuitos analizados. ....	116
Tabla 7.24 Ahorro de energía total y mensual. ....	122



### Índice de figuras

Figura 5.1. Elementos de una batería de arranque convencional.....	29
Figura 5.2. Proceso de fabricación de las baterías de plomo ácido. ....	31
Figura 5.3. Régimen de carga de tensión constante .....	35
Figura 5.4. Régimen de carga de corriente constante.....	36
Figura 5.5. Régimen de carga de corriente constante – tensión constante. ....	38
Figura 5.6. Régimen de carga de corriente constante – tensión constante – tensión constante. ....	39
Figura 5.7. Régimen de carga de intermitente.....	41
Figura 5.8. Régimen de carga de interrumpida. ....	42
Figura 5.9. ISO 50001.....	47
Figura 6.1. Planificación energética.....	55
Figura 6.2. Ubicación de la radiación infrarroja en el espectro. ....	56
Figura 6.3. Análisis termográfico para sistemas mecánicos y motores eléctricos.....	58
Figura 6.4. Análisis termográfico en sistemas y conexiones eléctricas.....	58
Figura 6.5. Cámara termográfica. Ti 200.....	59
Figura 6.6. Analizador de redes Fluke 435 II. ....	62
Figura 6.7. Analizador de redes Dranetz Power Visa. ....	63
Figura 6.8. Pinza amperimétrica modelo ET-4080.....	63
Figura 6.9. Metodología de SS. ....	65
Figura 7.1 Comportamiento mensual de la producción y el consumo de electricidad 2011-2014. .....	71
Figura 7.2 Diagrama de Pareto del consumo eléctrico por área. ....	73

PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA	10
Figura 7.3 Circuito de carga de baterías. ....	73
Figura 7.4 Patrón de corriente y la tensión en el régimen de carga intermitente.....	74
Figura 7.5 Línea base energética. ....	74
Figura 7.6. Línea base, meta y de deterioro.....	77
Figura 7.7. Línea base energética diaria. ....	78
Figura 7.8. Línea base, meta y de deterioro.....	79
Figura 7.9. Línea base energética diaria empleando batería equivalente. ....	81
Figura 7.10. Cantidad de mediciones realizadas por circuitos.....	83
Figura 7.11. Análisis de correlación para validar el IEE. ....	87
Figura 7.12. Indicador de eficiencia energética de referencia para el control del IEE. ....	89
Figura 7.13 Factores que influyen en la EE del proceso de formación de baterías. ....	90
Figura 7.14. Comparación de medias del IEE según el transformador de alimentación. ....	92
Figura 7.15. Tensiones de línea de los dos transformadores. ....	93
Figura 7.16. Comparación de medias del IEE de los turnos de trabajo. ....	95
Figura 7.17. Comparación de medias del IEE según la hora de inicio del proceso de formación. (1 de 23.00 a 05.00; 2 de 05.00 a 11.00; 3 de 11.00 a 17.00 y 4 de 17.00 a 23.00) .....	98
Figura 7.18. Gráfico de medias del IEE según el análisis LSD para todos los circuitos.....	99
Figura 7.19. Gráfico de medias del IEE según el análisis LSD de los circuitos seleccionados. ....	102
Figura 7.20. Esquema de conexión de los circuitos.....	104
Figura 7.21. Pérdidas por circuito.....	107
Figura 7.22. Gráfico de pérdidas en los conductores de los circuitos.....	108
Figura 7.23. Conductores deteriorados. ....	110
Figura 7.24. Instalación deficiente de los conectores en los bornes. ....	111

Figura 7.25. Conectores deteriorados. ....	111
Figura 7.26. Análisis termográfico en los circuitos 91, 93 y 94. ....	112
Figura 7.27. Análisis termográfico en los bornes de entrada en los circuitos 157, 161 y 162. ..	113
Figura 7.28. Análisis termográfico en las mesas de los circuitos 91, 93 y 94. ....	114
Figura 7.29. Análisis termográfico en las mesas de los circuitos 157, 161 y 162. ....	115
Figura 7.30. Análisis termográfico en las mesas de los circuitos 198 y 216. ....	116
Figura 7.31. Tensiones registradas por circuito y recomendada por la literatura. ....	119
Figura 7.32. Tensiones medidas en las baterías y recomendada por la literatura. ....	120
Figura 7.33. Resultados del análisis mensual del desempeño energético en la empresa. ....	122

### **Resumen**

La presente investigación tiene como objetivo la mejora del desempeño energético en el consumo de electricidad para el proceso de formación de baterías de una fábrica en Colombia, mediante la planificación energética según el procedimiento establecido por la norma ISO 50001. En el trabajo se identifican las áreas de uso significativo de la energía eléctrica, se realiza una revisión energética que inicia con la aplicación de técnicas de trabajo en grupo, mediciones de campo y se diseña e implementa un indicador de desempeño energético que permite evaluar sistemáticamente la eficiencia en el proceso de formación de baterías. Al mismo se le realiza un análisis estadístico, se identifican los parámetros con influencia significativa y se proponen un grupo de acciones que comienzan a aplicarse a finales del 2015. Durante el primer semestre del 2016 se realiza una evaluación que brinda excelentes resultados con un ahorro de energía total de 201 934kWh (3,48 %), equivalente a 81 783 675 COP.

*Palabras clave: planificación energética, fábrica de baterías, ahorro de energía, ISO 50001*

### **Abstract**

The objective of this research is to improve the energy performance in the electricity consumption for the battery charging process in a Colombian factory, considering energy planning strategies according to the procedure established by the standard ISO 50001. There were identified areas with its significant uses of energy consumptions, an energy review is carried out which starts with the application of work group techniques, measurements and an energy performance indicator is designed and implemented in order to systematically evaluate the efficiency in the battery charging process. Also, it was developed a statistical analysis used to identify parameters with a significant influence in the process, a group of actions are proposed and applied at the end of 2015. During the first semester of 2016 an evaluation is realized providing successful results with a total energy saving of 201.934 kWh (3.48%), equivalent to \$81.783.675 COP.

*Keywords: energy planning, battery factory, energy savings, ISO 50001.*

## Introducción

Desde finales del siglo pasado los aspectos relacionados con la energía han pasado a ser de primera prioridad a todos los niveles de discusión. Esto se debe a que el consumo energético tiene mayor crecimiento que la población y el uso mayoritario de combustibles fósiles es causa evidente del cambio climático, lo que es una de las principales amenazas a la sostenibilidad ((Kaygusuz, 2012).

La producción industrial es una de las actividades con mayor consumo de energía, el 29 % del total global (Fawkes et al., 2016). Sin embargo, es también una de las que más potencial de ahorro tiene, estimado; en el orden del 20 % del consumo, lo que equivale a una reducción de 974 millones de toneladas de petróleo equivalente (mtpe). ((Chan & Kantamaneni, 2015; Fawkes et al., 2016)). Una de las principales vías para el aprovechamiento de ese potencial es la eficiencia energética (EE) a través de la mejora en la gestión de la energía (GE) (Abdelaziz, Saidur, & Mekhilef, 2011).

La GE es definida por (Abdelaziz et al., 2011; Cabello et al., 2016) como un conjunto de actividades que se realizan para minimizar los costos y los impactos ambientales debido al uso de la energía sin afectar los niveles y la calidad de la producción; lo que requiere la mejora continua del desempeño energético a través del control, monitoreo, planificación y el desarrollo de acciones y estrategias para incrementar la EE (Bunse, Vodicka, Schönsleben, Brühlhart, & Ernst, 2011).

Aunque se han logrado avances significativos en la implementación de la GE en numerosos países (Cabello Eras et al., 2015; Christoffersen, Larsen, & Togeby, 2006; Gielen & Taylor, 2009; Hens et al., 2017; Palamutcu, 2010; Posch, Brudermann, Braschel, & Gabriel, 2015; Rudberg, Waldemarsson, & Lidestam, 2013; Vine, 2005; Weinert, Chiotellis, & Seliger,

2011), se reconoce que el potencial de la GE y las acciones de EE para reducir el consumo de energía y el impacto ambiental del sector industrial está aún lejos de ser totalmente aprovechado (Bunse et al., 2011; Cagno & Trianni, 2014; European Commission (EC), 2014; Giaccone & Mancò, 2012; ISO, 2014; Ospino-Castro, 2010; Weinert et al., 2011). Colombia no es la excepción y en el sector industrial del país existen grandes potenciales para la gestión energética y la implementación de acciones de gestión energética (León, Díaz, & Solano, 2018)

La presente investigación se desarrolla en una empresa de producción de baterías, y se encuentra estructurada de la siguiente manera. Un capítulo inicial en el cual se aborda el proceso de fabricación de la batería, los diferentes regímenes de carga y la gestión energética aplicada al proceso de formación basados en la ISO 50001, específicamente en su etapa de planificación energética. En el segundo capítulo se explica la metodología aplicada y las principales técnicas y procedimientos utilizados durante la etapa de planificación. Un tercer capítulo donde se muestra la implementación de la metodología; se identifican los principales factores que inciden en el consumo energético del área de formación de batería y se aplican un grupo de acciones de los cuales se obtienen ahorros significativos en el consumo de energía.

## 1. Planteamiento del problema

Las baterías eléctricas son elementos vitales en numerosas aplicaciones; siendo más utilizadas las de plomo ácido, de las cuales se producen tres tipos: baterías de arranque, de tracción y estacionarias. Estas son empleadas en el transporte automotor, vehículos eléctricos y para almacenamiento de energía, respectivamente. Alrededor de 385 millones de baterías (principalmente de arranque) se comercializaron en **2012**, lo que representó un valor de mercado de 41.500 millones de dólares (Miloloža, 2013).

La fabricación de baterías de plomo ácido requiere grandes cantidades de energía térmica y eléctrica para transformar los materiales básicos en piezas necesarias para la batería. (Jung et al., 2015; Pavlov, 2011; Sullivan y Gaines, 2010). La fabricación de baterías de plomo ácido tiene tres etapas fundamentales (Rantik, 1999, Dahodwalla et al., 2000): fabricación de la rejilla, montaje de la batería y el proceso de formación siendo este último el de mayor consumo de electricidad, representando más del 50% del consumo total de la energía (Jung et al., 2016).

La fábrica de baterías colombiana analizada tiene una elevada intensidad energética, su consumo mensual de energía eléctrica está en el orden de los 700 MWh y la facturación alcanza valores superiores a los 170.000.000 COP. El área de formación es la de mayor consumo de energía dentro de la empresa y dentro de esta el proceso de carga consume aproximadamente el 53 % del total de la planta. Su importancia en el consumo eléctrico hace imprescindible la siguiente pregunta de investigación

**¿Será posible mejorar la eficiencia energética del proceso de formación de baterías y reducir su consumo energético a través de la gestión de la energía y la mejora de las prácticas operacionales?**



## 2. Justificación

La mayor parte de las baterías producidas a nivel mundial son de arranque. Estas tuvieron, en el año **2012**, ventas en el orden de los 41.5 billones de dólares (Miloloza, 2013); su fabricación tiene una elevada intensidad energética consumiendo grandes cantidades de energía eléctrica y otros portadores energéticos (D. Pavlov, 2011; Report Buyer Ltd., 2015; Rydh, 1999; Sullivan & Gaines, 2012). De acuerdo con (Rydh & Sandén, 2005) se estima que por cada kg de batería producida se consumen de 15 a 34 MJ, dependiendo si los materiales provienen del reciclado o de materias primas vírgenes. El 30% de esta energía se consume en el proceso de fabricación, principalmente para el accionamiento de las máquinas, procesos térmicos para la transformación de los materiales, ensamble de las baterías, sistemas auxiliares; así como en el proceso de formación de las baterías (Jung, Zhang, & Zhang, 2016; D. Pavlov, 2011; Sullivan & Gaines, 2012) En este último proceso se cargan por primera vez y simultáneamente los lotes de baterías, siendo este donde mayores el consumo de energía eléctrica. Este proceso es de gran importancia, ya que de la forma en que se realiza depende la vida útil y el desempeño de la batería.

A pesar de la elevada intensidad energética del proceso de fabricación de baterías de plomo ácido, son escasos en la literatura especializada las investigaciones que abordan este aspecto. El presente trabajo tiene como objetivo principal proponer acciones que permitan mejorar el desempeño energético en el proceso de carga mediante la implementación del procedimiento de planificación energética establecido por la norma ISO 50001 en una fábrica de baterías colombiana.

Además permitirá dar los primeros pasos para la implementación de un Sistema de

## PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA

Gestión de la Energía que a mediano plazo complemente el Sistema Integrado de Gestión de la empresa, el cual se encuentra certificado por las normas ISO 9000 “Sistema de gestión de la calidad”, ISO 14000 “Sistema de Gestión ambiental e ISO 45001 “Sistemas de Gestión de Seguridad y Salud Laboral”, lo que contribuirá significativamente a la mejora de la gestión y del desempeño integral de la compañía (Cañizares et al., 2015)

### **3. Objetivos**

#### **3.1 General**

Proponer acciones que permitan mejorar el desempeño energético en el proceso de formación mediante la implementación del procedimiento de planificación energética establecido por la norma ISO 50001

#### **3.2 Específicos**

Realizar un estudio documental sobre las tecnologías utilizadas en los procesos industriales de formación de baterías automotores, su consumo energético y la gestión de la energía en ellos.

Establecer y validar un indicador de desempeño energético para el proceso de formación de baterías que permita evaluar sistemáticamente su eficiencia energética tanto a nivel general de la empresa como al interior del proceso de formación.

Identificar los parámetros operacionales, infraestructurales y humanos que más influyen en la eficiencia energética del proceso de formación de baterías.

Proponer acciones y buenas prácticas para incrementar la eficiencia energética del proceso de formación de baterías; implementación y evaluación de los resultados.

#### **4. Aspectos metodológicos**

Esta investigación estuvo estructurada en varias fases que guardan coherencia con los objetivos específicos del proyecto y agrupan una serie de actividades puntuales. Es importante resaltar que el estudio implicó la recopilación de información documental a partir de diferentes fuentes bibliográficas, así como la información de los procesos de formación de baterías realizados durante tres años.

Se empleó una metodología de investigación aplicada mediante el cual se pretende proponer acciones de gestión de la energía para mejorar la eficiencia energética en el proceso de formación de baterías en la empresa.

A continuación, en la tabla 4.1 se presenta la Matriz de Actividades que muestra la relación entre los objetivos, las actividades y una breve descripción de éstas desarrolladas en el marco de la investigación.



## PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA

Tabla 4.1

*Matriz de actividades*

Objetivo General	Objetivos específicos	No	Actividad	Descripción
Proponer acciones que permitan mejorar el desempeño energético en el proceso de carga mediante la implementación del procedimiento de planificación energética establecido por la norma ISO 50001	Realizar un estudio documental sobre las tecnologías utilizadas en los procesos industriales de formación de baterías automotores, su consumo energético y la gestión de la energía en ellos.	1	Revisión bibliográfica	Realizar una búsqueda de información especializada sobre el proceso de carga de baterías y su eficiencia energética, identificar las publicaciones seriadas que publican sobre el tema y los principales autores.  Sistematizar la información recopilada y obtención de conclusiones al respecto.
	Diseñar y validar un indicador de desempeño energético para el proceso de formación de baterías que permita evaluar sistemáticamente su eficiencia tanto a nivel general de la empresa como al interior del proceso de formación	1	Diseño de un indicador de desempeño energético para el proceso de formación de baterías.	Recopilación de la información de los procesos de formación de baterías para su procesamiento que permita realizar propuestas para el indicador de desempeño energético  Realizar los análisis de regresión requeridos para establecer el indicador de desempeño energético
		2	Validación del indicador de desempeño energético.	Recopilación de la información de los procesos de formación de baterías realizados durante dos años para su procesamiento y transformación con el objetivo de validar el indicador de desempeño energético.
	Identificar los parámetros operacionales, infraestructurales y humanos	1	Identificación de los parámetros operacionales,	Planificar las sesiones de trabajo en grupo con técnicos y operarios encargados del proceso.

## PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA

que más influyen en la eficiencia energética del proceso de formación de baterías.	infraestructurales y humanos que presuntamente tienen mayor influencia en la eficiencia energética del proceso.	Desarrollar las sesiones de trabajo en grupo.
	Evaluación de la influencia de los parámetros operacionales, infraestructurales y humanos incluidos en la investigación sobre la eficiencia energética del proceso y el valor del indicador de desempeño energético que la evalúa.	Procesar los resultados, definir y argumentar los parámetros operacionales, infraestructurales y humanos que serán investigados.
2	Propuestas de metodologías para el control de los principales parámetros operacionales,	Reorganización de la base de datos para la determinación de los valores del indicador de desempeño energético en cada proceso organizándolos según los factores a analizar. Procesamiento estadístico de la información y determinación de los parámetros operacionales, infraestructurales y humanos que influyen en la eficiencia energética del proceso y la forma en que lo hacen.
3	infraestructurales y humanos que influyen en la eficiencia energética del proceso.	Evaluación de la significación práctica de las conclusiones del análisis estadístico. Definición de los parámetros de control a aplicar para la evaluación de la influencia de los parámetros operacionales, infraestructurales y humanos.
		Propuesta de metodología para la evaluación sistemática de los parámetros operacionales, infraestructurales y humanos.

## PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA

---

Proponer acciones y buenas prácticas para incrementar la eficiencia energética del proceso de formación de baterías; implementación y evaluación de los resultados.	1	Evaluación de campo de las prácticas operacionales, implementación y evaluación de los resultados	Propuesta de acciones para eliminar las deficiencias identificadas.  Implementar y evaluar los resultados obtenidos en la UFB.
---	---	---	--

---

Nota: *Elaboración propia*



## **5. Capítulo 1: Estudio documental en la fabricación de baterías de plomo ácido y gestión de la energía aplicando la norma ISO 50001**

### **5.1. Generalidades sobre baterías eléctricas**

Una batería o acumulador eléctrico es un dispositivo electroquímico que permite almacenar energía en forma química mediante el proceso de carga, y liberarla como energía eléctrica, durante la descarga, mediante reacciones químicas reversibles cuando se conecta con un circuito de consumo externo. Todas las baterías son similares en su construcción y están formadas por un número de celdas compuestas de electrodos positivos y negativos, separadores y electrolito. El tamaño, diseño interno y los materiales utilizados controlan la cantidad de energía disponible de cada celda (Jossen, Garche, & Sauer, 2004).

Existen dos tipos de baterías, las primarias que no pueden ser cargadas una vez hayan sido descargadas, estas deben ser remplazadas por otra batería y las secundarias denominadas también acumuladores, las cuales pueden ser recargadas. (Pérez, V., & Carlos, J. 2003). Las baterías primarias se usan comúnmente en potencias bajas, es por eso que su tamaño físico es pequeño, mientras que las baterías secundarias son utilizadas en potencias bajas, medias y altas y su construcción física es variable. Las baterías secundarias medias y de alta capacidad tienen una variedad de aplicaciones, comúnmente se utilizan para el arranque en los motores de combustión interna, pero hoy en día gracias a su desarrollo tecnológico han tenido acogida en otras aplicaciones como fuentes de energía para los vehículos eléctricos e híbridos (Rand, D. A. J., & Woods, R. 1981), (Forero, Estrada, & Guerrero, 2018). Las baterías secundarias pueden clasificarse de diferentes formas de acuerdo a sus características físicas, su funcionamiento, la tecnología

## PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA

utilizada para su fabricación, su eficiencia, campo de aplicación y hasta por su composición química. En la actualidad existen diferentes tipos de baterías como las baterías de níquel-cadmio, las baterías de níquel-hidruro metálico, las baterías de litio, baterías de plomo ácido y las baterías de plomo ácido con válvulas reguladoras las cuales se describen a continuación:

- ❖ **Baterías de níquel-cadmio (Ni-Cd):** Están conformadas por una pieza de hidróxido de níquel en su cátodo y otra de cadmio en su ánodo sumergido en hidróxido de potasio. De acuerdo a su configuración constructiva, están diseñadas para ser recargada. Al igual que las baterías de plomo ácido selladas, también existen baterías de níquel-cadmio selladas, lo cual facilita la recombinación de los gases producidos durante la sobrecarga de los electrodos de cada una de las celdas (Payne, 2001). Este tipo de batería se puede encontrar en una amplia gama de aplicaciones como; aparatos electrodomésticos, de video, herramientas profesionales, aparatos de comunicaciones, productos electrónicos de consumos entre otros (Putois, 1995).
- ❖ **Baterías de níquel-hidruro metálico (Ni-MH):** Se utilizan ampliamente como fuente de alimentación de vehículos eléctricos así como en dispositivos electrónicos de consumo. Su demanda es buena debido a su menor impacto sobre el medio ambiente, garantizando su sostenibilidad además de poseer una mayor capacidad de carga (Nishimura, Takasaki, & Sakai, 2013). Las baterías de Ni-MH son muy similares a las baterías de Ni-Cd, su ánodo está conformado por una pieza de hidróxido de níquel y su cátodo está compuesto por una aleación de hidruro metálico que permite almacenar el hidrógeno que

## PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA

se genera durante la carga y liberarlo durante la descarga lo que las hace menos pesadas (Berndt, 1998).

- ❖ **Batería de litio (Li-ion):** Están compuestas por un ánodo de grafito, un cátodo de óxido de metal de litio y un electrolito de solución de sal de litio, este tipo de baterías son ligeras, compactas y trabajan con un tensión del orden de 4 V (Scrosati & Garche, 2010). La baterías de litio no requieren mantenimiento, no tienen efecto memoria y no es necesario realizar un reciclado cada cierto número de cargas, el tiempo de autodescarga es menos de la mitad que otros tipo de baterías, utilizadas en aparatos como teléfonos móviles, ordenadores portátiles, MP3 y otros (Ordóñez, 2011).
- ❖ **Baterías de plomo ácido:** Conocidas como pilas secundarias, son las más usadas en la actualidad representando el 70 % de las ventas a nivel mundial. Es un tipo de batería tradicional, de bajo costo, rápida disponibilidad y componentes fácilmente reciclables. El electrodo positivo tiene un depósito de dióxido de plomo y el electrodo negativo de plomo metálico. En la descarga se produce la disociación de ácido sulfúrico de manera que el dióxido de plomo y el plomo metálico se transforman de manera gradual en sulfato de plomo, también se forma agua, con lo cual el electrolito va disminuyendo su densidad y quedando menos ácido. Poseen una gran capacidad de descarga durante un breve periodo de tiempo, lo que las hace ideales para el arranque de motores de combustión interna, su forma más conocida es la batería de automóvil (Ordóñez, 2011).
- ❖ **Baterías de plomo ácido con válvulas reguladas:** Baterías selladas o reguladas

## PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA

con válvulas VRLA (Valve-Regulated Lead Acid). El escape de los gases producidos por la electrólisis del electrolito es controlado automáticamente por una válvula de presión. El electrolito está inmovilizado por una estera de vidrio o por gel que simplifica el manejo de la batería y se reducen las necesidades de mantenimiento (Jossen et al., 2004). Tiene un coste relativamente bajo, es una batería de respaldo usada en equipos portátiles y equipos de automatización de oficinas y fábricas.

### 5.2. Tipos de baterías de plomo ácido

Las baterías de plomo ácido, de acuerdo a su aplicación, se clasifican de la siguiente forma (Detchko Pavlov, 2011):

- ❖ **Baterías de arranque:** Se diseñan para ser utilizadas en motores de combustión interna para automóviles, camiones, tractores etc. Este tipo de batería de arranque es capaz de descargar el máximo de corriente en un corto espacio de tiempo manteniendo una alta tensión en un amplio rango de temperaturas; además tiene la capacidad de soportar descargas a diferentes temperaturas.
- ❖ **Baterías de tracción:** Son utilizadas para suministrar energía a vehículos eléctricos, carretillas elevadoras, aspiradores eléctricos, carros de golf, equipos de minerías etc. Este tipo de baterías están sujetas a descargas prolongadas a baja intensidad, durante varios periodos de tiempo, lo que supone un alto grado de profundidad de descarga.
- ❖ **Baterías estacionarias:** Se utilizan comúnmente como fuente de alimentación de reserva en sistemas de telecomunicaciones, sistemas de alarmas de encendido, alumbrado de emergencia, sistema de alimentación interrumpida (UPS), entre

## PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA

otros. Se caracterizan por estar sometidas de forma continua a recargas con tensión constante para mantener su nivel de carga.

### 5.3. Componentes de la batería de plomo ácido de arranque

Para transformar la célula de las baterías de plomo ácido en una fuente de energía práctica, se deben cumplir varios requisitos de diseño. En la siguiente figura se muestra los diferentes elementos que componen una batería de arranque convencional (Jung, Zhang, & Zhang, 2015) ver figura 5.1.

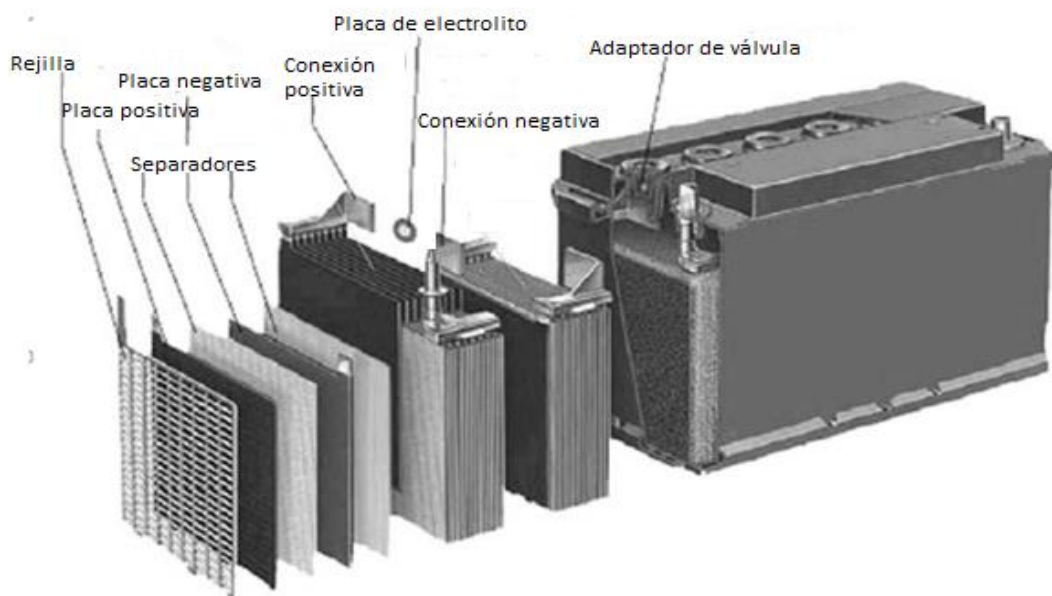


Figura 5.1. Elementos de una batería de arranque convencional. Adaptado de (Jung et al., 2015).

- ❖ **Electrolito:** Conductor iónico compuesto de ácido sulfúrico y agua destilada que permite cerrar el ciclo de corriente mediante el transporte de iones en el interior de la celda. El electrolito debe tener buena estabilidad térmica, alta conductividad iónica, bajo efecto corrosivo en los electrodos y bajo nivel de impurezas.
- ❖ **Electrodos:** Están formados por placas positivas, placas negativas y separadores. Las placas positivas son el resultado de empastar la rejilla de plomo con una

## PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA

pasta o material activo compuesta por peróxido de plomo y ácido sulfúrico. La rejilla sostiene el material activo y actúa como conductor de corriente eléctrica. En las placas negativas las rejillas se empastan con una pasta de plomo esponjoso y ácido sulfúrico. Cuando la batería está cargada, la materia activa de los electrodos positivos es dióxido de plomo y la materia activa de los electrodos negativos es plomo metálico.

- ❖ Rejillas: Elemento estructural que soporta la materia activa. Suelen ser de aleaciones de plomo con algún agente endurecedor como el antimonio o el calcio, en las que los aleantes confieren las características químicas, mecánicas y metalúrgicas óptimas para servir de soporte o alojamiento para la materia activa y proporcionar conductividad.
- ❖ Separadores: Láminas aislantes de material microporoso de baja resistencia eléctrica que se colocan entre las placas. Su función es la de aislar eléctricamente los electrodos de diferente polaridad, evitando cortocircuitos internos y a su vez permiten el transporte iónico entre ánodos y cátodos. Entre los materiales utilizados en los separadores tipo hoja se encuentran los celulósicos, los de fibra de vidrio y los de PVC.
- ❖ Caja o recipiente: Estructura fabricada generalmente en polipropileno de alta resistencia. Su función es albergar todos los componentes internos, que permiten el proceso electroquímico de la batería.
- ❖ Tapa o cubierta: Fabricada de polipropileno de alta resistencia, permite mantener sellados los vasos contenidos en la caja, impidiendo la salida del electrolito. Generalmente son fabricadas en materiales aislantes, resistentes y livianos.

## PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA

- ❖ **Conectores:** Piezas destinadas a conectar eléctricamente los elementos internos de una batería; están hechos con aleaciones de plomo-antimonio o plomo cobre.
- ❖ **Bornes:** Positivos o negativos, permiten la salida de energía acumulada en la batería o en la entrada cuando está descargada, se conectan al sistema eléctrico del vehículo.

### 5.4. Proceso de fabricación de las baterías de plomo ácido de arranque

En la figura 5.2, se representa el proceso de fabricación de las baterías de plomo ácido y sus principales entradas de energías.

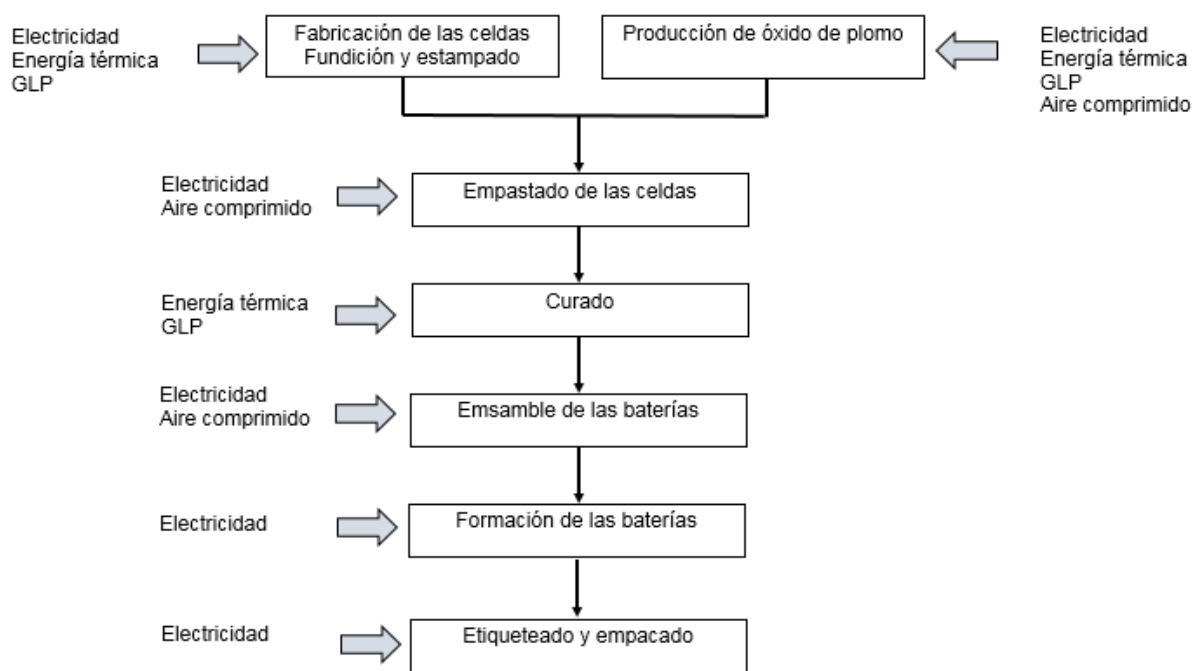


Figura 5.2. Proceso de fabricación de las baterías de plomo ácido. Elaboración propia

En el proceso de fabricación de las celdas la materia prima utilizada es una aleación de plomo, estas se fabrican mediante la fundición en moldes de libro o mediante procesos continuos como el estampado, la extrusión y la fundición continua con rodillado posterior. En este proceso el portador energético con mayor consumo es la energía

## PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA

térmica, utilizada para la fundición del plomo, que se obtiene generalmente de GLP o petróleo seguido de la energía eléctrica para el accionamiento de las máquinas (Jung et al., 2015).

El óxido de plomo es el principal componente activo de los electrodos positivos y negativos de las baterías y se utiliza en el recubrimiento de las celdas. En su proceso de producción la materia prima es plomo de alta pureza el cual se funde en un crisol y se agita con una paleta rotatoria para ponerlo en contacto con una corriente de aire. El principal consumo energético en esta etapa es la energía térmica para la fundición del plomo seguido del consumo de aire comprimido y la electricidad para el accionamiento de las máquinas.

En el proceso de empastado las celdas se rellenan y se cubren con la pasta de óxido de plomo, en esta etapa se consume energía eléctrica para el accionamiento de las máquinas. Posteriormente son curadas en un ambiente de temperatura y humedad controlado durante 32 horas por lo que se consume energía térmica para garantizar las condiciones del ambiente en la curación de la pasta y (Jung et al., 2016).

En el proceso de ensamble se instalan todos los componentes de la batería dentro del cuerpo y se sella, quedando apta para el suministro del electrolito. En esta etapa el principal consumo de energía es la electricidad y el aire comprimido para el accionamiento de las máquinas y dispositivos que realizan el ensamble (Jung et al., 2016).

El proceso de formación de las baterías consiste en la carga de la batería por primera vez; en el ocurren procesos químicos en las rejillas que las transforman en electrodos positivos y negativos activos. Este proceso es esencial para el desempeño y la vida útil de las baterías por lo que se realiza siguiendo patrones previamente establecidos



## PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA

para el comportamiento de la tensión y la corriente (D. Pavlov, 2011). En las baterías de arranque el proceso de formación se realiza en instalaciones especiales denominadas unidades de formación de baterías (UFB) que realizan el proceso por lotes. Este proceso es el principal consumidor de energía eléctrica en la fabricación de baterías de arranque (Jung et al., 2016).

### **5.5. Proceso de formación de las baterías de plomo ácido**

Durante la formación de la batería, la electricidad se transforma en la energía química almacenada en la batería. Este proceso es esencial para un adecuado rendimiento y duración de la batería (Cope et al., 1999, Thi Minh, 1999, Pavlov et al., 2000, Petkova y Pavlov, 2003). El proceso de formación consume gran parte de la electricidad, representando más del 50% del consumo energético total de la fabricación de baterías (Jung et al., 2016).

En el proceso de formación, se colocan varias baterías en una mesa, las cuales son conectadas en serie. Debido a la generación de calor resultante de la formación de la batería, se utiliza un sistema de refrigeración para mantener una temperatura adecuada en el proceso. La corriente y la tensión utilizadas en el circuito de formación afectan tanto: el consumo de electricidad como el rendimiento y duración de la batería. Por lo tanto, la selección y el control adecuado de la corriente y de la tensión es esencial para la eficiencia, la vida útil y la calidad del lote de baterías terminado (Jung et al., 2016).

Existen diferentes algoritmos para controlar la corriente y la tensión utilizado en el proceso de formación (Wong, Hurley, & Wölfle, 2008) los cuales se muestran a continuación:

- ❖ Régimen de carga a tensión constante (CV)

## PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA

- ❖ Régimen de carga a corriente constante (CI)
- ❖ Régimen de carga de corriente constante-tensión constante (CICV)
- ❖ Régimen de carga de corriente constante-tensión constante - tensión constante (CICVCV)
- ❖ Régimen de carga intermitente (IC)
- ❖ Régimen de control de carga interrumpida (ICC).

Los regímenes de carga CV y CICV son los empleados tradicionalmente en los procesos de carga de baterías (Yuasa Battery Inc., 2009)(EnerSys, 2006). El régimen de carga IC es una alternativa de los regímenes de carga accionados por tensión (voltage driven charge regime), mientras que el ICC incorpora un control del ancho de pulso de corriente (Wong et al., 2008).

El régimen de carga (ICC) es un mejoramiento del régimen de carga (IC), pues permite la equalización de las tensiones de las celdas en una cadena (string) de baterías y evita el problema potencial de baja carga que presenta ese régimen. El régimen (ICC) reduce además, el grado de sobrecarga que se presenta en los regímenes de carga de (CV), (CI), (CICV) y (CICVCV) (Wong et al., 2008).

### **5.5.1. Régimen de carga a tensión constante (CV).**

El régimen de carga de tensión constante (CV) se ilustra en la figura 5.3, donde se observa que bajo una carga de tensión constante ( $V_{cv}^{(1)}$ ) la batería se carga con una corriente que comienza con un valor pico muy alto. La tensión de carga es mantenida y la corriente de carga disminuye con el tiempo para mantener constante la tensión hasta que la batería alcance un estado de carga del 100%. La corriente de arranque al comienzo del proceso de carga disminuye la eficiencia del ciclo interno de oxígeno e induce una alta temperatura y una degradación de la duración de la batería, como

## PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA

consecuencia se incrementa significativamente la pérdida de agua (Chih-Chiang Hua & Meng-Yu Lin, 2000). La tensión de carga recomendado por el fabricante de baterías esta típicamente en el rango de 2,23-2,3 V por célula (EnerSys, 2006). El final de carga se produce en el momento ( $t_c$ ) cuando la corriente de carga alcanza un valor constante.

El régimen de carga de CV es fácil de implementar y no se necesita ninguna unidad de detección extra para cambiar entre los modos de funcionamiento (Wong et al., 2008). El método de carga de tensión constante se puede ver reflejado en aplicaciones industriales para recargar baterías de plomo-ácido. A menudo se utiliza para vehículos en carretera y aplicaciones de servicios públicos, telefónicos y UPS donde el circuito de carga está fijado a la batería (Jung et al., 2015).

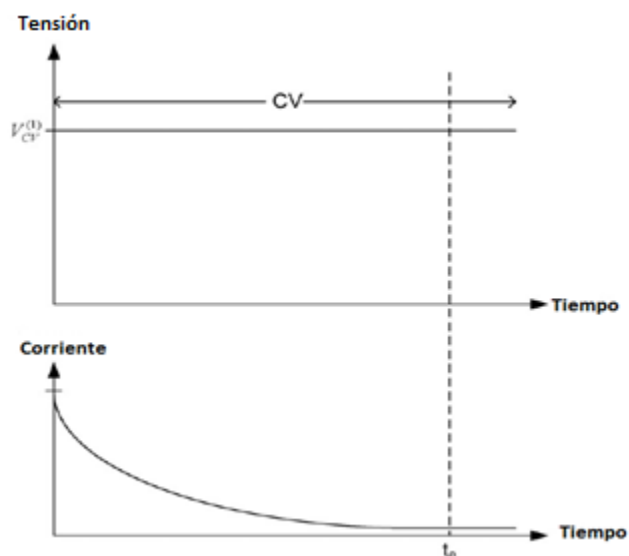


Figura 5.3. Régimen de carga de tensión constante. Adaptado de (Wong et al., 2008).

### 5.5.2. Régimen de carga a corriente constante (CI).

Es un método de carga simple que utiliza corrientes constantes para la carga de la batería, normalmente conectadas en serie e iguales (Chih-Chiang Hua & Meng-Yu Lin, 2000). En el régimen de carga de corriente constante (CI), la batería se carga con

## PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA

una corriente de carga de regulación ( $I_{CI}^{(1)}$ ) hasta el estado totalmente cargado y se mantiene en sobrecarga a una pequeña corriente de sobrecarga de regulación ( $I_{CI}^{(2)}$ ) como se ilustra en la figura 5.4, este régimen permite evitar una excesiva elevación de la temperatura en la batería los que disminuye la corrosión y las pérdidas de agua. En el régimen de carga CI, no hay regulación de tensión de carga. La batería puede ser cargada por una tensión de carga de hasta 3V por celda, que es determinado por la corriente de carga (EnerSys, 2006).

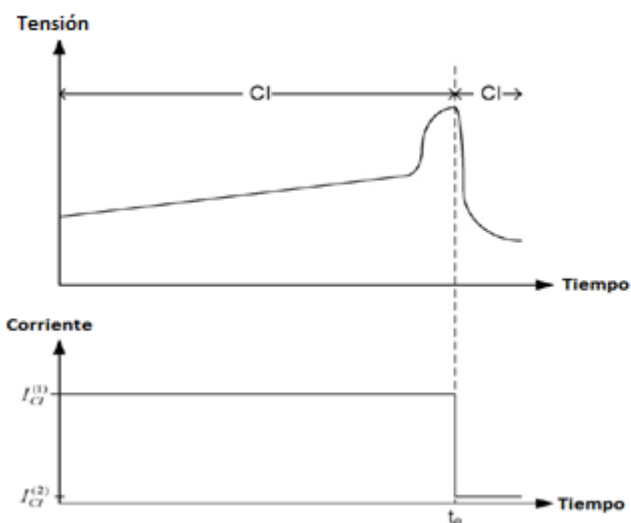


Figura 5.4. Régimen de carga de corriente constante. Adaptado de (Wong et al., 2008).

Cuando la batería se encuentra totalmente cargada en el momento ( $t_e$ ), la corriente de carga cambia de ( $I_{CI}^{(1)}$ ) a ( $I_{CI}^{(2)}$ ) para mantenerla en estado de sobrecarga. En este estado el rango de variación de la temperatura es de 0,002 °C lo que evita una intensa evolución del oxígeno en las placas positivas e hidrógeno en las negativas (Wong et al., 2008).

La detección de fin de carga es muy importante en el régimen de carga de corriente constante (CI) para evitar daños a la batería. El final de carga puede determinarse usando un temporizador o detectando el cambio de tensión de carga. El

## PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA

temporizador determina la duración de tiempo requerido para recargar el 105-110% de los amperios-horas previamente descargados, que pueden ser difíciles de medir en la práctica. En el primer modo de régimen de carga de corriente constante (CI), la tensión de la batería aumenta y alcanza un valor de pico y luego comienza a disminuir hasta un valor de estado estacionario. La batería está completamente cargada cuando la tensión alcanza su valor máximo en el tiempo ( $t_e$ ). De acuerdo a diferentes autores el problema con la detección de fin de carga puede solucionarse introduciendo un modo de tensión constante después del modo CI (Wong et al., 2008).

### **5.5.3. Régimen de carga a corriente constante-tensión constante (CICV)**

El régimen de carga de corriente constante - tensión constante (CICV) es un método de carga que combina dos etapas (CI) seguido de (CV); en la primera etapa de la carga (CI), las baterías se cargan con una corriente constante ( $I_{CICV}^{(1)}$ ) hasta que la batería alcanza una tensión regulada ( $V_{CICV}^{(1)}$ ). En la segunda etapa (CV) se aplica una tensión constante ( $V_{CICV}^{(1)}$ ) para la carga de la batería como se ilustra en la figura 5.5 (Chih-Chiang Hua & Meng-Yu Lin, 2000).

La corriente de carga ( $I_{CICV}^{(1)}$ ), en la etapa CI se ajusta para evitar un aumento de la temperatura de la batería superior a los 0,4 °C. En ( $V_{CICV}^{(1)}$ ) la corriente inicial se mantiene constante hasta una tensión promedio en la batería de 2.39 V por celda de acuerdo a recomendaciones por el fabricante, la corriente disminuye a tensión constante hasta la velocidad de acabado de 4,5 a 5 A por 100 Ah, que se mantiene hasta el final de la carga (Coleman, Hurley, & Lee, 2008).

La batería es sobrecargada por la misma tensión de carga, ( $V_{CICV}^{(1)}$ ), cuando está completamente cargada en el tiempo, ( $t_e$ ). El final de carga se identifica cuando la

## PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA

corriente de carga alcanza un pequeño valor constante. El régimen de carga (CICV) es el equilibrio de las ventajas y desventajas de los regímenes de (CI) individual y de carga (CV) (Wong et al., 2008).

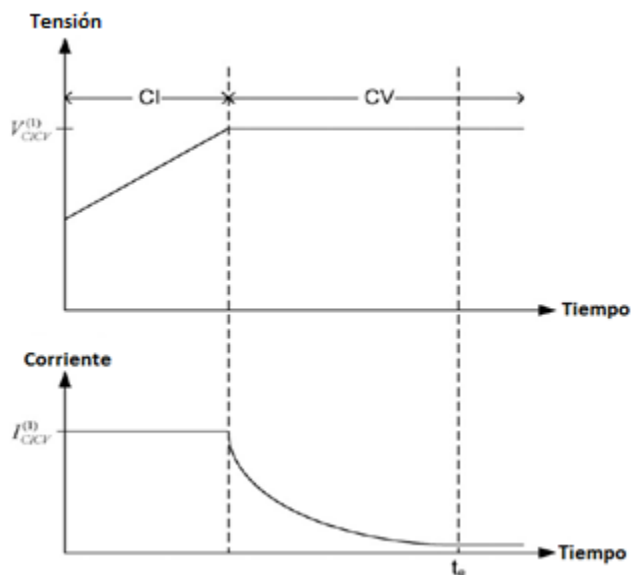


Figura 5.5. Régimen de carga de corriente constante – tensión constante. Adaptado de (Wong et al., 2008)

### 5.5.4. Régimen de carga a corriente constante-tensión constante – tensión constante (CICVCV).

Es un método con tres etapas; corriente constante (CI), tensión constante (CV) alto y tensión constante (CV) bajo, esta tercera etapa es con el fin de mejorar el régimen de carga de corriente constante- tensión constante (CICV) como se ilustra en la figura 5.6. En la primera etapa (CI), se inicia el ciclo de carga, en la que la batería se carga con una corriente constante ( $I_{CICVCV}^{(1)}$ ) hasta que la carga alcance una tensión de regulación alta ( $V_{CICVCV}^{(1)}$ ). La tensión de carga rápida recomendado por el fabricante de baterías está en el rango de 2,3 a 2,5V por celda y la corriente ( $I_{CICVCV}^{(1)}$ ) se selecciona para evitar un aumento de la temperatura mayor a  $0,4^{\circ}\text{C}$  (EnerSys, 2006).

La segunda y tercera etapa se compone del modo (CV) alto y (CV) bajo. Cuando la corriente de carga alcanza un valor de regulación baja ( $I_{CICVCV}^{(2)}$ ) que es 25% de

## PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA

( $I_{CICVCV}^{(1)}$ ) o cuando la duración del tiempo en el modo (CV) alto alcance el período recomendado por el fabricante de 8 horas, lo que ocurra primero, el modo de carga conmuta desde el modo (CV) alto al modo (CV) bajo. En el modo (CV) bajo la batería se carga a una tensión de regulación baja ( $V_{CICVCV}^{(2)}$ ) hasta 100% del estado de carga. La tensión de regulación ( $V_{CICVCV}^{(2)}$ ) se selecciona con la tensión de carga recomendada por el fabricante, normalmente en el rango de 2,23-2,30 V por celda. El final de carga se detecta cuando la corriente de carga alcanza un pequeño valor constante. La alta tensión de carga en el modo (CV) alto aumenta la tasa de corrosión de la rejilla y la tasa de evolución del hidrógeno, dando como resultado la degradación o corto tiempo de vida útil de la batería (Wong et al., 2008).

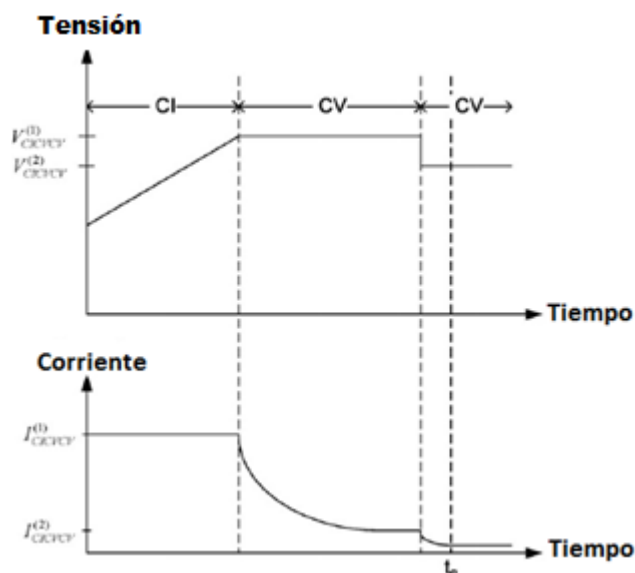


Figura 5.6. Régimen de carga de corriente constante – tensión constante – tensión constante. Adaptado de (Wong et al., 2008)

### 5.5.5. Régimen de carga intermitente (IC).

El régimen de carga intermitente consta de dos etapas (CI) y (IC). En el modo CI, la batería se carga a una corriente constante ( $I_{IC}^{(1)}$ ), cuando la tensión de carga alcanza la tensión de regulación superior ( $V_{IC}^{(1)}$ ), el modo de carga cambia de CI al modo IC. En el

## PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA

modo IC, la batería se carga durante un corto período de tiempo y luego se mantiene en circuito abierto hasta que las tensiones de la batería caen y activa la tensión de regulación inferior ( $V_{IC}^{(2)}$ ), en ese momento la batería se recarga con una corriente constante ( $I_{IC}^{(2)}$ ) durante un corto período de tiempo. Este proceso de recarga se repite intermitentemente como se ilustra en la figura 5.7. El régimen de carga intermitente fue desarrollado para evitar la sobrecarga continua de los regímenes de carga CV, CI, CICV y CICVCV (Wong et al., 2008).

El rango de oscilación y el ciclo de trabajo de ( $I_{IC}^{(2)}$ ) se determinan por ( $V_{IC}^{(1)}$ ) y ( $V_{IC}^{(2)}$ ). En el modo CI, ( $I_{IC}^{(1)}$ ), se establece en el intervalo de temperatura de 0,1-0,4°C. En el modo ( $I_{IC}^{(2)}$ ) se establece en un valor cercano a 0,05°C. En ( $V_{IC}^{(1)}$ ) se establece por el rango recomendado de 2,40-2,45V por celda, en ( $V_{IC}^{(2)}$ ) se fija por encima de la tensión de carga de flotación recomendada en el rango de 2,12V-2,14V por celda, esto para reiniciar el proceso de recarga y mantener la oscilación del estado de carga entre 95% y 100% (Wong et al., 2008).

El final de carga se identifica cuando el ciclo de trabajo de la corriente de IC alcanza el valor de estado estable. El régimen de IC reduce el grado de sobrecarga de la batería y conduce a una mayor duración de la batería. El rendimiento de carga del régimen de IC depende en gran medida de las tensiones de regulación ( $V_{IC}^{(1)}$ ) seleccionado para cargar completamente la batería con el grado mínimo de sobrecarga y ( $V_{IC}^{(2)}$ ) seleccionado para proporcionar una altura de tensión suficiente para el proceso de recarga (Wong et al., 2008).



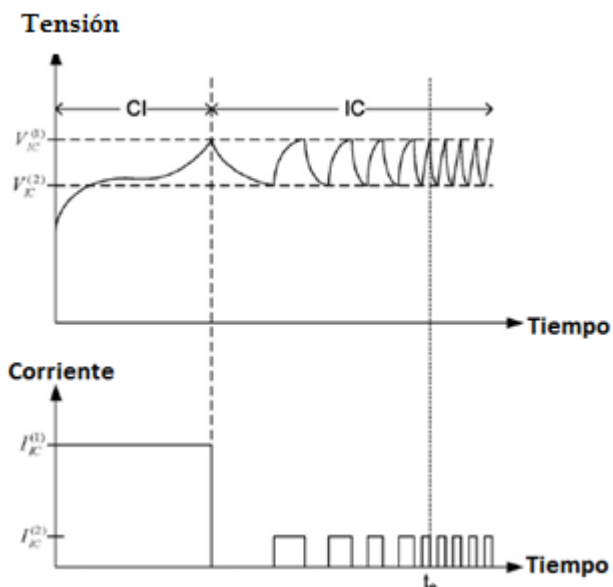


Figura 5.7. Régimen de carga de intermitente. Adaptado de (Wong et al., 2008)

### 5.5.6. Régimen de carga interrumpida (ICC).

El régimen de carga interrumpida (ICC) es un régimen con cinco parámetros de regulación (VICC (1), VICC (2), VICC (3), IICC (1) e IICC (2)), que requiere una unidad de control autónoma con un microcontrolador. Este régimen de carga se caracteriza por mantener la batería en un estado de ligera baja carga, reduciendo el peligro de sulfatación y permitiendo ecualizar la tensión de cada celda (Wong et al., 2008).

El régimen de ICC presenta cuatro modos denominados; modo de corriente constante (CI), modo de reposo (rest), modo de carga interrumpida (ICC) y modo de circuito abierto (OC) (Wong et al., 2008). En la figura 5.8, se muestra las curvas características de tensión y corriente correspondiente a cada modo.

## PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA

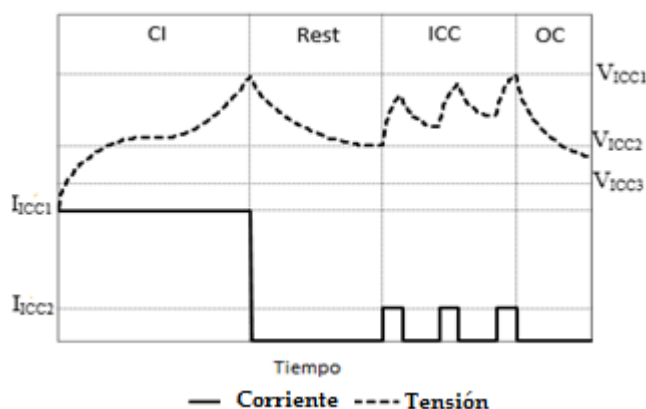


Figura 5.8. Régimen de carga de interrumpida. Adaptado de (Wong et al., 2008)

En el modo CI, la batería es cargada con una corriente de carga masiva ( $I_{ICC(1)}$ ) a 0,1 de la capacidad de corriente ampere-hora de la batería. En este modo el objetivo es cargar la batería a un estado de carga por encima de 0,97% donde el estado de carga es la división entre los ampere-hora de descarga y la capacidad de corriente ampere-hora de la batería (Coleman et al., 2008). Cuando la tensión de la batería alcanza la tensión umbral superior ( $V_{ICC(1)}$ ), el modo de operación cambia al modo de reposo (rest). En este modo la batería se mantiene en circuito abierto para reducir su resistencia interna y proveer de mayor capacidad libre de alimentación de tensión para el modo ICC. Cuando la tensión de la batería cae a la tensión umbral inferior ( $V_{ICC(2)}$ ), el modo de operación cambia al modo ICC (Wong et al., 2008).

En el modo ICC la batería es cargada con pulsos de corrientes regulados ( $I_{ICC(2)}$ ) con un período de 30 segundos y un ciclo de operación de 33,3% a 25°C. El ciclo de operación en los pulsos de corriente, es la relación entre el tiempo de conexión en relación al período de modulación del pulso (Cataliotti, Genduso, Raciti, Member, & Galluzzo, 2007). En el modo ICC, la batería es cargada a 100% del estado de carga con 2-3% de sobrecarga para equalizar las tensiones de celda. Cuando la batería alcanza

## PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA

nuevamente la tensión VICC(2), la batería se carga completamente y se pasa al modo de operación OC (Cataliotti et al., 2007).

En el modo OC ocurren reacciones de semi-descarga en la batería y por lo tanto, la tensión de la batería se reduce. En este modo la batería es monitoreada para evitar excesivas y continuas sobrecargas. Se controla además, la caída de tensión de la batería y se recarga los amperes-horas descargados cuando el estado de carga es inferior al 97%. Con este modo se evita la descarga gradual que ocurre en el electrodo negativo de la batería que no es fácil de percibir. Se reduce, además, el efecto de la corrosión acumulada en las rejillas y las pérdidas de agua que se produce en la reacción evolutiva del hidrógeno. Cuando la tensión de la batería cae debajo del umbral de la tensión de carga de inicio (VICC (3)) el ciclo de carga es reiniciado con el modo CI (Cataliotti et al., 2007).

Los parámetros de regulación (VICC (1), VICC (2), VICC (3), IICC(1) e IICC(2)), deben de cumplir los requerimientos siguientes; el límite de la tensión VICC(1) establecido no debe de sobrepasarse para evitar la generación de gas de hidrógeno (Hou et al., 2005).

La tensión límite superior, VICC (1), se establece a la tensión de carga rápida recomendada de 2,45 V por celda (14,7 V para baterías de seis celdas) para cargar la batería a un alto estado de carga en el modo CI (Wong et al., 2008). La tensión VICC (2) se establece en el rango entre (2,14–2,16V) por celda (12,84-12,96 V) para baterías de seis celdas) para alcanzar el modo ICC. La tensión VICC (3) debe de seleccionarse en un rango entre (2,12–2,14V) por celda, (12,72-12,84 V para baterías de seis celdas) dependiendo del material activo de la batería. El valor seleccionado debe de corresponderse con un estado

## PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA

de carga de 97% para minimizar la tasa de sulfatación (Wong et al., 2008).

### **5.6. Gestión de la Energía**

La gestión de la Energía (GE) es un conjunto de actividades que se realizan por una organización para minimizar los costos y los impactos ambientales debido al uso de la energía sin afectar los niveles y la calidad de la producción; lo que requiere la mejora continua del desempeño energético a través del control, monitoreo, planificación y el desarrollo de acciones y estrategias para incrementar la Eficiencia Energética (EE) (Bunse et al., 2011), Vesma, V. 2009). A través de ella se identifican oportunidades de mejora en aspectos relacionados con la calidad y seguridad de los sistemas energéticos, logrando que los usuarios conozcan el sistema, identifiquen las áreas y equipos de mayor consumo e implanten mejoras, alcanzando altos niveles de EE (García Samper, Guiliany, & Eras, 2017).

Aunque se han logrado avances significativos en la implementación de la GE en numerosos países (Cabello Eras et al., 2015; Christoffersen et al., 2006; Gielen & Taylor, 2009; Hens et al., 2017; Palamutcu, 2010; Posch et al., 2015; Rudberg et al., 2013; Vine, 2005; Weinert et al., 2011), se reconoce que el potencial de la GE y las acciones de EE para reducir el consumo de energía y el impacto ambiental del sector industrial está aún lejos de ser totalmente aprovechado producto a la falta de conocimiento sobre cómo implementar mejoras y lo que es más importante, la falta de una estructura organizativa consistente en la mayoría de las instalaciones industriales para gestionar eficazmente el uso de energía. (Bunse et al., 2011; Cagno & Trianni, 2014; European Commission EC, 2014; Giacone & Mancò, 2012; ISO, 2014; Ospino-Castro, 2010; Weinert et al., 2011).

## PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA

Después de un intenso trabajo, entre los años 2005 y 2011, para la creación de un estándar mundial en sistemas de gestión de la energía por parte de la Organización Internacional de Normalización (ISO) se aprueba en el año 2011 la ISO 50001 donde se recoge la experiencia de diversos modelos internacionales como ( DS 2403:2001, SS 67750:2003, ANSI/EMS 2000:2005, IS 393:2005, UNE 216301:2007 y EN 16001:2009) y se sintetizan sus principales características para lograr un Sistema de Gestión de la Energía (SGE) exitoso y aplicable a cualquier tipo de organización. Este proceso fue un paso trascendental en el desarrollo de la GE, al disponerse de un estándar internacional que define los requisitos generales de un SGE para establecer una política energética con objetivos concretos encaminados a mejorar la EE. La aplicación de esta norma permite definir las áreas que más influyen sobre el consumo energético, elaborar pronósticos del consumo de energía, identificar potenciales de ahorro y proponer las acciones necesarias para su aprovechamiento.

### **5.7. ISO 50001**

La norma ISO 50001 (ISO, 2011) se crea con el objetivo de facilitar a las organizaciones el establecimiento de los sistemas y procesos necesarios para mejorar su desempeño energético; En ella se establecen los requisitos que debe tener un SGE en una organización para sintetizar la mejora de su desempeño energético, el aumento de su eficiencia energética y la reducción de los impactos ambientales (Hens et al., 2018). Es aplicable a todo tipo de organizaciones y el éxito de su implementación depende de los compromisos adquiridos por todos los implicados y especialmente de la alta dirección.

Esta norma internacional se basa en el ciclo de mejora continua ; Planificar- Hacer- Verificar- Actuar (Soto et al., 2014), como se muestra en la figura 5.9 y puede

## PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA

resumirse de la siguiente forma:

- ❖ Planificar : Se centra en entender el comportamiento energético de la organización para establecer la línea de base, los indicadores de desempeño energético (IDEn), los objetivos, las metas y los planes de acción necesarios que permitan mejorar el desempeño energético.
- ❖ Hacer: Implementar los planes de acción de gestión de la energía
- ❖ Verificar: Monitorear y medir los resultados de procesos y estrategias que se han puesto en marcha en base a las políticas, objetivos y características claves de las operaciones y reportar su resultado.
- ❖ Actuar: Tomar acciones para mejorar continuamente el desempeño energético y el SGE en base a los resultados.

Esta norma busca proveer una estructura de sistemas y procesos necesarios para la mejora del desempeño energético. Enfoca su gestión en cambios organizacionales, preparación de los recursos humanos, cambios tecnológicos, mantenimiento de equipos y cambios en los procesos operacionales y de gestión que contribuyan al desempeño energético (Avella Campos, Caicedo Prías, Oqueña Quispe, Medina Vidal, & Figueroa Lora, 2008)

## PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA

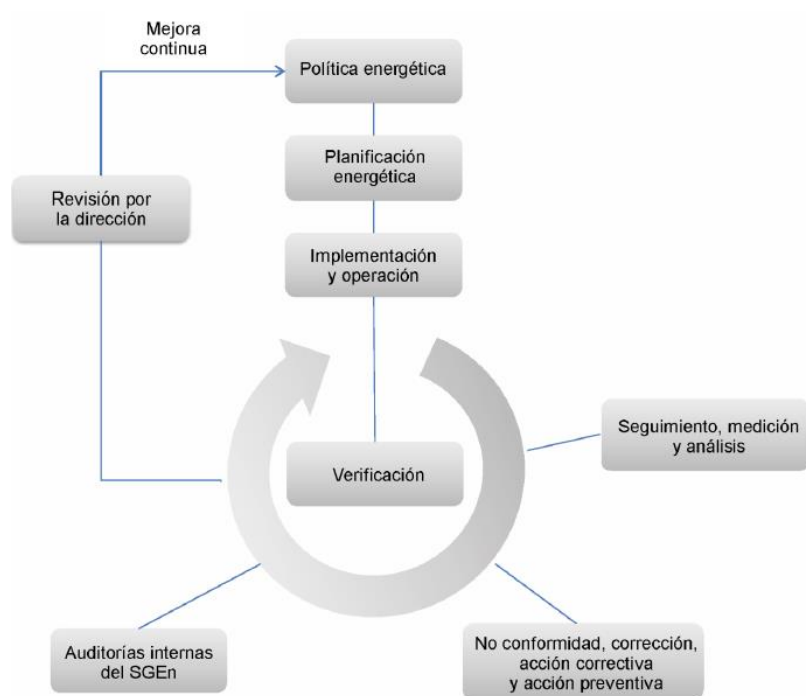


Figura 5.9. ISO 50001. Tomado de (ISO, 2011)

### 5.7.1. Requisitos de un SGE.

Un aspecto de gran importancia es que la alta dirección de la empresa demuestre su compromiso en apoyar el sistema y en mejorar continuamente su eficacia, que disponga de los recursos necesarios y que defina claramente los roles y responsabilidades de los actores del SGE. La alta dirección también ha de designar un representante suyo con autoridad y responsabilidad para asegurar que el SGE se establezca, se mantenga y se mejore de forma continua de acuerdo con los requisitos de esta norma. Entre otras funciones, tendrá las de gestionar a los agentes implicados e informar a la alta dirección sobre el desempeño energético alcanzado.

Para implementar un SGE, es necesario que la organización realice y documente un proceso de planificación energética, en la que se debe tener en cuenta diversos aspectos relacionados con el uso y consumo energético en la organización como se

## PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA

muestra en el anexo A4 de la ISO 50001 traducción al español. Esta deberá ser coherente con la política energética definida previamente y conducir de manera continua a la mejora del desempeño energético.

El primer paso en el proceso de planificación, es la identificación de los requisitos en materia energética que le aplican, pueden ser legales u otro tipo que la organización haya suscrito. Se debe tener acceso a los mismos, se debe determinar cómo se van a aplicar y asegurar que se tendrán en cuenta en las diferentes etapas de la implementación del SGE.

En un segundo paso, la organización debe llevar a cabo una revisión energética la cual debe ser documentada de manera física o digital. Debe analizarse y conocerse el pasado y presente de los consumos energéticos, basándose para ello en mediciones y otros datos con el objetivo de conocer las áreas de mayor consumo. Se deben identificar los aspectos que influyen en estos consumos y la necesidad de realizar un diagnóstico energético enfocado en la optimización del sistema. Debe haber un control de la documentación, para asegurar que los documentos utilizados sean vigentes y no obsoletos. Esta revisión energética generalmente se clasifica con diferentes grados de profundidad.

Revisión energética nivel (0). Es una modalidad donde con la información disponible (esencialmente datos históricos de la facturación energética y la producción), y con un recorrido por las instalaciones, así como con entrevistas con el personal encargado de mantenimiento y energía, se realiza el diagnóstico. Este tipo de diagnósticos encuentra su principal aplicación, cuando lo que se pretende es tener una primera imagen de las áreas de oportunidad en materia de ahorro de energía.



## PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA

Revisión energética nivel (1). Es esencialmente una recolección preliminar de información y el análisis de ésta, con énfasis en la identificación de fuentes evidentes de posible mejoramiento en el uso de la energía. Proporciona una visión general de los patrones de utilización y los costos de la energía. Esto puede proporcionar una guía para ajustar el sistema de recolección de datos y análisis, así como proporcionar al personal de operación una nueva perspectiva con respecto a los equipos y su adecuada operación.

Revisión energética nivel (2). Consiste en un análisis completo de toda la parte energética de una planta, tanto equipos y sistemas auxiliares, como también los detalles en los procesos. En una revisión energética de nivel 2 la medición de los parámetros eléctricos de los principales equipos consumidores de energía es fundamental.

Revisión energética nivel (3). Es una modalidad del nivel 2, donde el análisis del proceso es muy exhaustivo, incorporándose el análisis para diferentes tecnologías de producción. Para la realización de este tipo de diagnósticos es imprescindible la participación de un especialista en el proceso de la industria a diagnosticar. Este tipo de diagnóstico prácticamente no se realiza debido a que su costo es muy alto y a que normalmente una revisión de nivel 2 arroja oportunidades de ahorro de energía que pueden ir desde un 10 hasta un 30%, con inversiones cuyo período de recuperación suele ser menor a los 2 años.

Con la información obtenida en la revisión energética inicial, la organización debe establecer una o varias líneas bases de consumo que se utilizarán como base de comparación para determinar la evolución del desempeño energético y calcular los ahorros energéticos. Se deben identificar los indicadores de desempeño energético (IDEns) que, por comparación con la línea base, servirán para su seguimiento y

## PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA

medición.

La organización debe fijar, documentar y planificar adecuadamente sus objetivos y metas en coherencia con la política energética y las oportunidades de mejoras detectadas en la etapa de revisión energética.

En la etapa de implementación y operación se deben llevar a cabo los planes de acción resultados del proceso de planificación. Para ello, se debe garantizar que todo el personal implicado en la realización de las tareas relacionadas con los usos significativos de la energía, sea, competente, con formación, habilidades y experiencia adecuada. Por otra parte debe asegurarse una comunicación efectiva, de la información relacionada con el desempeño energético, para que cualquiera persona implicada pueda realizar sus aportes y comentarios para la mejora del SGE.

La fase de verificación comprende todas aquellas actividades destinadas a evaluar la evolución del desempeño energético y del SGE para la detección de problemas y poder corregir desviaciones.

Deben verificarse las características claves de las operaciones que determinan el desempeño energético, a través del monitoreo, el seguimiento, la medición y el análisis, así como la evaluación del cumplimiento de los requisitos legales y otros. Deben realizarse auditorías internas del SGE para asegurar que se cumplan con las condiciones planificadas y que el sistema se mantenga, sea eficaz, se evidencie mejora en el desempeño energético y se cumplan con los objetivos energéticos fijados.

Las organizaciones deben tratar las no conformidades detectadas, haciendo las respectivas correcciones y tomando acciones correctivas y preventivas, así como también el control de registros que evidencie las actividades realizadas y que demuestre los

## PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA

resultados logrados en el desempeño energético.

En la revisión por la dirección deben identificarse los avances y mejoras en el desempeño energético, de acuerdo con los objetivos y metas planteadas y deben mantenerse registrados. La alta dirección debe establecer las bases de actuación para el próximo ciclo o periodo y la necesidad de recursos para su logro.

### **5.7.2. Eficiencia Energética en el proceso de formación de baterías.**

La energía eléctrica consumida en el proceso de formación de baterías depende del número de baterías que forman el lote, de la tensión en la línea de suministro y de los amperes-hora acumulados en las baterías y puede ser calculada por la siguiente ecuación (Kiessling 1992):

$$E_p = N \cdot V_{CD} \cdot C \quad (\text{Wh}) \quad (1)$$

Donde:

$E_p$  - energía consumida en el proceso de formación (Wh)

$N$  – número de baterías en el lote

$V_{CD}$ : la tensión en la línea de suministro (V).

$C$ : capacidad de carga de las baterías (Ah).

La mayor parte de la energía consumida en el proceso se almacena en las baterías, pero hay pérdidas en el interior de estas, fundamentalmente en calor y en el rectificado CA/CD y en la línea de suministro. Por el peso específico del proceso de formación en el consumo eléctrico total de la formación de baterías y su influencia en los costos estas pérdidas deben ser controlada y reducidas lo más posible. La eficiencia de la UFB se define como la relación entre la energía útil acumulada en las baterías y la energía suministrada al sistema y depende entre otras cosas de factores como las características y

## PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA

estado técnico de los equipos, efectividad del sistema de mantenimiento, prácticas operacionales y la calidad de la energía entre otros. (Kiessling, 1992).

La EE en el proceso de formación es complicada de evaluar por la dificultad en determinar con precisión la energía útil acumulada en las baterías, las pérdidas internas en las baterías, las pérdidas en las líneas y las pérdidas en el rectificador en condiciones reales de operación. Sin embargo es posible medir o determinar la energía consumida en el proceso de formación de cada lote (esta incluye las pérdidas), lo que es útil para evaluar la EE ya que cuanto menor sea esta para un mismo tipo y cantidad de baterías más eficiente será el proceso. A partir de los parámetros del proceso registrados por la computadora de control es posible determinar la energía real consumida según la ecuación 2 (Ponce-Silva & Moreno-Basaldúa, 2015).

$$E_r = \int_0^{t_1} p(t) dt = \int_0^{t_1} V_{DC}(t) \cdot I_{DC}(t) dt \quad (2)$$

Donde:

$E_T$ : energía consumida en el proceso de formación (Wh).

$p(t)$  – potencia instantánea (W).

$V_{DC}$  – tensión en la línea de suministro (V)

$I_{DC}$  – corriente en la línea de suministro (A)

Para resolver la integral se puede aplicar la regla del trapecio, lo que permite calcular la energía consumida a partir de los registros que realiza la computadora de la tensión y la corriente en la línea de suministro según la ecuación 3.

$$E_T = \sum_{i=1}^n V_{CDi} \cdot I_{CDi} \cdot t \quad (3)$$

## PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA

Donde:

n – número de valores registrados

VCDi – tensión registrada en el intervalo i. (V)

ICDi – corriente registrada en el intervalo i. (A)

t – intervalo de tiempo entre registros

$$t = \frac{T}{n}, s \quad (4)$$

T – tiempo total del proceso de formación (s)

La posibilidad de determinar el consumo real de energía para todos los procesos cuyos parámetros estén almacenados en la base de datos, permite a partir de su correlación con la producción desarrollar un indicador de EE (IEE) para evaluar la influencia de diferentes parámetros en esta. La metodología a seguir toma como punto de partida las recomendaciones de ISO 50004 y 50006 (ISO, 2012; ISO, 2014) para el desarrollo de un IEE en la etapa de planificación energética en los Sistemas de Gestión de la Energía.

## **6. Capítulo 2: Materiales y métodos**

### **6.1. Descripción de la instalación**

El estudio se desarrolló en una fábrica de baterías colombiana, la cual tiene una producción anual de 1.110.900 baterías de 168 tipos diferentes, con un consumo mensual de energía eléctrica que está en el orden de los 700 MWh y la facturación alcanza valores superiores 170.000.000 COP.

Esta empresa está dividida en dos áreas fundamentales; El área administrativa y el área de producción que está subdividida en las sub-áreas de producción y ensamble, aire comprimido y mesas de carga; en esta última se consume la mayor cantidad de energía eléctrica y es donde se centra esta investigación.

### **6.2. Metodología aplicada**

La aprobación de la norma ISO 50001 en el año 2011 fue un paso trascendental en el desarrollo de la GE a nivel internacional, pues estableció los requisitos generales para un SGE. La aplicación de esta norma permite entre otras cosas identificar las áreas que más inciden sobre el consumo energético, pronosticar y planificar el consumo de energía, identificar potenciales de ahorro y proponer las acciones necesarias para su aprovechamiento. La norma plantea un modelo de cuatro etapas: política energética, planeación energética, implementación y verificación insertadas en un ciclo de mejora continua (Soto et al., 2014).

La etapa de planificación energética y las acciones que la componen se consideran el núcleo de un SGE. Esta etapa sienta las bases para el desarrollo de las estrategias de mejora del desempeño energético de las organizaciones, definiendo los objetivos específicos alcanzables y estableciendo las medidas para su cumplimiento. En la

## PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA

figura 6.1 se esquematiza esta etapa.

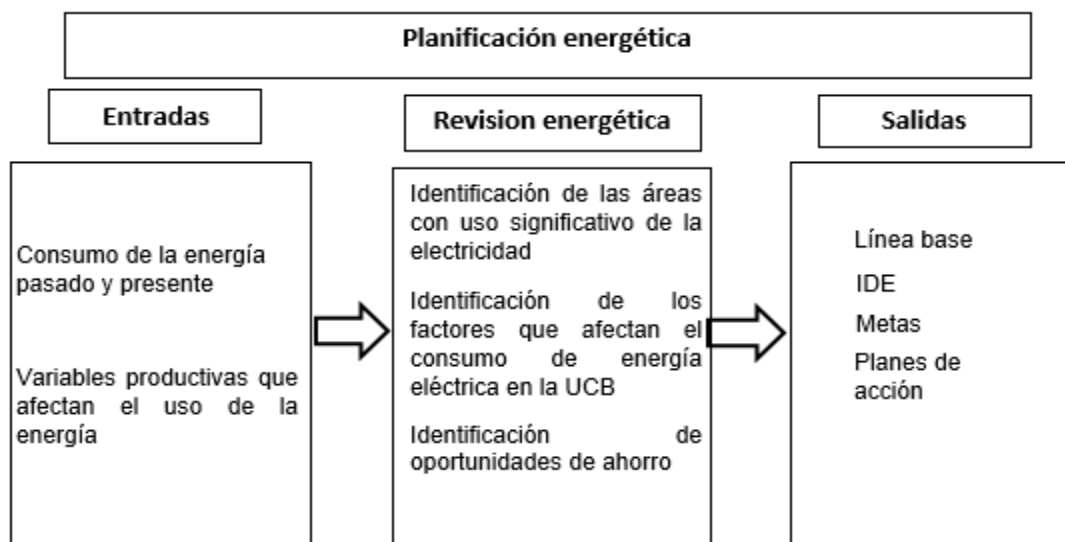


Figura 6.1. Planificación energética. Elaboración propia

En concordancia con lo establecido por la norma ISO 50004 (ISO, 2014), la metodología seguida en esta investigación consta de 8 pasos:

1. Determinar el consumo de la energía pasado y presente.
2. Determinar las variables productivas que afectan el uso de la energía
3. Identificar las áreas con uso significativo de la energía eléctrica.
4. Obtener de la línea base energética y la línea meta.
5. Construir de indicadores de desempeño energético (IDEn).
6. Identificar de los factores que afectan el consumo de energía eléctrica en la UFB.
7. Identificar de oportunidades de ahorro.
8. Implementar y evaluar la metodología propuesta.

### 6.3. Tecnología utilizada

#### 6.3.1. Termografía.

La radiación infrarroja descubierta en 1800 está entre el espectro visible y las microondas

## PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA

del espectro electromagnético como se muestra en la figura 6.2 siendo su principal característica la radiación térmica. Cualquier objeto con una temperatura superior al cero absoluto ( $-273,15\text{ °C}$  o  $0\text{ Kelvin}$ ) emite radiación en la región infrarroja (Soroko & Howell, 2018).

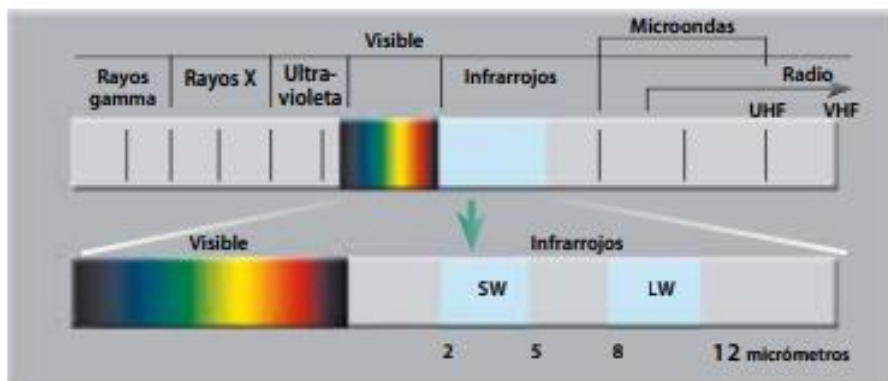


Figura 6.2. Ubicación de la radiación infrarroja en el espectro. Adaptado de (Soroko & Howell, 2018)

Las cámaras termográficas son una herramienta que permite llevar de una imagen de infrarrojos a una imagen radiométrica, a través de complejos algoritmos, que permita leer los valores de temperatura (Soroko & Howell, 2018). Para ello la energía de infrarrojos que irradia un objeto se enfoca con el sistema óptico sobre un detector de infrarrojos, este envía los datos al sensor electrónico para procesar la imagen y el sensor traduce los datos en una imagen, compatible con el visor y visualizable en un monitor de vídeo estándar o una pantalla LCD (Azenha, Faria, & Figueiras, 2011).

La termografía se ha convertido en una de las herramientas de diagnóstico más valiosas para el mantenimiento predictivo debido a sus numerosas ventajas (Xu, Xie, Huang, Chen, & Gong, 2018) dentro de las cuales podemos mencionar:

- ❖ Alta resolución espacial y muy amplios rangos de temperaturas desde  $-20\text{ °C}$  hasta  $2500\text{ °C}$ .
- ❖ Incremento de la seguridad y velocidad en las inspecciones.



## PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA

- ❖ Permite la reducción de fallas inesperadas extendiendo el tiempo de vida de equipos o maquinarias.
- ❖ Permite aumentar la confiabilidad y eficiencia de un sistema mediante el análisis de tendencias en el desarrollo de problemas.
- ❖ Asegura una mejora en la calidad de las reparaciones y nuevas instalaciones.
- ❖ Es no intrusivo; por lo tanto no requiere contacto físico ni modificación de las variables, sustancias o elementos del sistema analizado.
- ❖ Práctico y portátil, sobre todo en áreas peligrosas de trabajo

### ***6.3.1.1. Aplicaciones de la termografía.***

La termografía es ampliamente utilizada para conocer el estado de los sistemas mecánicos y eléctricos, mediante esta se pueden detectar fugas, válvulas defectuosas, obstrucciones o problemas con el revestimiento, estado de los materiales refractarios en diferentes instalaciones como hornos o calderas, falsos contactos en circuitos eléctricos y sobrecalentamiento de motores por citar algunos (Laborda, Robinson, Wang, Zhang, & Reed, 2018).

Los sistemas mecánicos se recalientan cuando comienza a aparecer desgastes en rodamientos, correas, cintas transportadoras, también se aprecia un aumento de la temperatura ante problemas de alineación y fallos en acoplamientos, para el caso de los motores los signos de desgaste en el contacto de las escobillas y los cortocircuitos en los armazones, suelen producir un calor excesivo antes del fallo pero son imposibles de detectar mediante un análisis de vibraciones puesto que con frecuencia generan poca o ninguna vibración (Picazo-Ródenas, Royo, Antonino-Daviu, & Roger-Folch, 2013). La termografía en estos casos constituye una herramienta importante para detectar la aparición de estas fallas y corregirla a través de un mantenimiento preventivo como se muestra en la figura 6.3 (Glowacz & Glowacz, 2017).

## PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA

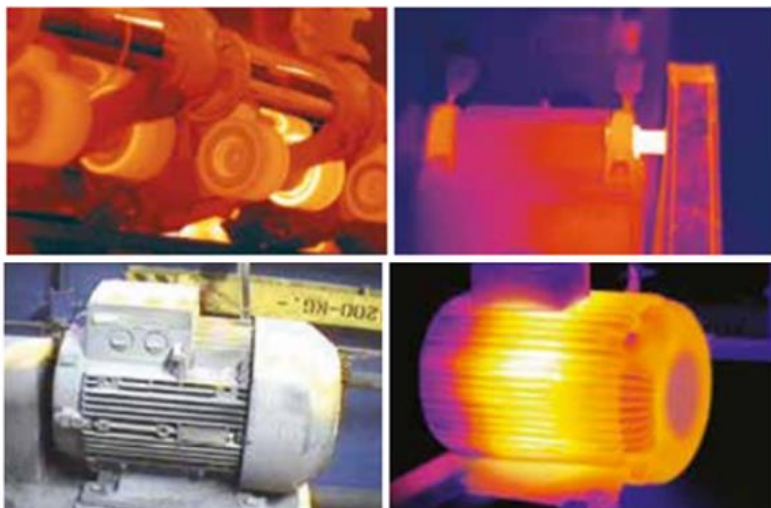


Figura 6.3. Análisis termográfico para sistemas mecánicos y motores eléctricos. Tomado de (ALAVA INGENIEROS, 2011)

El calor es un factor importante en las instalaciones eléctricas de alta y baja tensión. Cuando la corriente eléctrica pasa a través de un elemento resistivo, genera calor. Una mayor resistencia produce un aumento del calor. Con el tiempo, la resistencia de las conexiones eléctricas aumenta, debido, por ejemplo, a la holgura, corrosión, conexiones mal aseguradas y problemas de aislamiento. El correspondiente incremento de la temperatura puede hacer que los componentes fallen, lo que puede provocar cortes de tensión inesperados e incluso lesiones. Además, la energía empleada en generar calor provoca pérdidas de energía innecesarias. Si no se comprueba, el calor podría acumularse hasta el punto de fundir conexiones y provocar averías e incluso incendios.



Figura 6.4. Análisis termográfico en sistemas y conexiones eléctricas. Adaptado de (ALAVA INGENIEROS, 2011)

## PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA

En el presente trabajo se utilizó la termografía para detectar los puntos calientes en las mesas de carga que pudieran estar originados por problemas de conexión, calidad de los conectores, incumplimiento de los procedimientos establecidos, falta de mantenimiento entre otras que pueden ocasionar el incremento de la temperatura. A continuación se presenta las especificaciones de la cámara termográfica utilizada en esta investigación:

Tabla 6.1

*Especificaciones de la cámara termográfica Fluke 435Ti 200*

Marca	Fluke
Modelo	Ti 200
Rango de medición	-20 a 2000 °C
Temperatura funcionamiento	-10 a 50 °C
Humedad relativa	10 a 95 %
Altitud	2000
Pantalla	8,9 cm color VGA 540x480
Normatividad de seguridad	UL 61010-1 2012
Compatibilidad electromagnética	EN 61326-1 2006, IEC 61326-1 2005.
Impacto	25g
Caídas	Resiste caídas de 2 metros
Peso	1,04 Kg
Grado de protección	IP54

*Nota:* Elaboración propia a partir de (Fluke, 2014).



Figura 6.5. Cámara termográfica. Ti 200. Adaptado de (Fluke, 2014)

## PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA

### **6.3.2. Analizador de redes y pinza amperimétrica.**

Los analizadores de redes disponen de la más alta tecnología, miden una gran variedad de parámetros eléctricos, con el principal objetivo de obtener el control y la gestión de una instalación, máquina, industria, etcétera, permitiendo optimizar al máximo los costes energéticos. Estos presentan un grupo de ventajas que se enumeran a continuación:

- ❖ Permiten detectar y prevenir el exceso de consumo (kW·h)
- ❖ A través de ellos se pueden analizar curvas de carga y ver dónde se produce la máxima demanda de energía.
- ❖ A través de los análisis de calidad de la energía se puede detectar la necesidad de instalación de una batería de condensadores, así como su potencia.
- ❖ Permite prevenir fallos en las redes y equipos pues son muy útiles a la hora de planificar los mantenimientos periódicos ya que nos permiten, tanto en baja como en media tensión, ver curvas de arranque de motores, detectar posibles saturaciones del transformador de potencia, cortes de alimentación, deficiente calidad de suministro eléctrico, etc.
- ❖ Nos permiten analizar dónde tenemos un problema en la red eléctrica, para poder solucionar problemas de disparos intempestivos, fugas diferenciales, calentamiento de cables, resonancias, armónicos, perturbaciones, flicker, desequilibrios de fases, etc. Al mismo tiempo, nos permite diseñar los tamaños adecuados para los filtros activos o pasivos de armónicos y filtros para variadores de velocidad, etc.

La pinza amperimétrica es un medidor eléctrico que combina un voltímetro con un medidor de corriente tipo pinza, mide cualquier combinación de corriente alterna y directa, tensión en los rangos AC y DC y otros parámetros como la resistencia, prueba de continuidad,

## PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA

etc. Una de las grandes ventajas de la pinza amperimétrica es que permite la medición de parámetros mencionados anteriormente de forma activa sin la necesidad de interrumpir el circuito que se desea medir.

En el presente trabajo se utilizó el analizador de redes para medir el consumo de energía de los cinco transformadores que alimentan la planta además de parámetros eléctricos como la tensión, corriente, potencia activa, potencia reactiva, potencia aparente, factor de potencia, energía activa, energía reactiva, energía aparente, armónicos, desequilibrio de tensión, fluctuaciones de tensión, eventos transitorios entre otros. La pinza amperimétrica se empleó para medir las pérdidas en los conductores que conectan a las baterías y en los puntos de conexión. A continuación se presenta las especificaciones de los analizadores de redes y la pinza amperimétrica, utilizados para esta investigación:

Tabla 6.2

### *Especificaciones del analizador de redes Fluke 435 II*

Magnitud	Rango de medida	Precisión
Tensión (rms)	1 V a 1000 V fase a neutro	$\pm 0,1$ % del tensión nominal
Corriente (rms)	5 A a 6000 A	$\pm 0,5$ %
Frecuencia	51,000 Hz a 69,000 Hz	$\pm 0,01$ Hz
Factor de potencia	0 a 1	$\pm 0,1$ %
Potencia	Según escala de las pinzas	$\pm 1$ %
Energía	Según escala de las pinzas	$\pm 1$ %
Distorsión de Armónico Total (THD)	0,0 % a 100 %	$\pm 2,5$ %

*Nota:* Elaboración propia a partir de (Fluke, 2014).

## PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA



Figura 6.6. Analizador de redes Fluke 435 II. Tomado de (Fluke, 2014)

Tabla 6.3

*Especificaciones del analizador de redes Dranetz Power Visa*

Magnitud	Rango de medida	Precisión
Tensión (rms)	1 V a 600 V fase a neutro	$\pm 0,1$ % del tensión nominal
Corriente (rms)	0,1 A a 3000 A	$\pm 0,1$ %
Frecuencia	45,000 Hz a 65,000 Hz	$\pm 0,01$ Hz
Factor de potencia	0 a 1	$\pm 0,1$ %
Potencia	Según escala de la pinza	$\pm 1$ %
Energía	Según escala de la pinza	$\pm 1$ %
Distorsión de Armónico Total (THD)	0,0 % a 100 %	$\pm 2,5$ %

*Nota:* Elaboración propia a partir de (Dranetz, n.d.)

## PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA



Figura 6.7. Analizador de redes Dranetz Power Visa. Tomado de (Dranetz, n.d.).

Tabla 6.4

*Especificaciones de la pinza amperimétrica modelo ET-4080*

Magnitud	Rango de medida	Precisión
Tensión (rms)	2 V a 600 V fase a neutro	$\pm 1 \%$ del tensión nominal
Corriente (rms)	0 A a 1000 A	$\pm 1,5 \%$
Frecuencia	50,000 Hz a 60,000 Hz	$\pm 0,1$ Hz
Factor de potencia	0 a 1	$\pm 3 \%$
Distorsión de Armónico Total (THD)	0,0 % a 100 %	$\pm 5 \%$

*Nota:* Elaboración propia a partir de (Minipa, n.d.)



Figura 6.8. Pinza amperimétrica modelo ET-4080. Tomado de (Minipa, n.d.).

## PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA

### 6.3.3. Sensores Suaves

Medir y controlar los parámetros tecnológicos con la instrumentación adecuada es esencial para garantizar operaciones óptimas y seguras. Sin embargo, algunos parámetros son difíciles o demasiado costosos de medir. Para superar estas limitaciones, se utilizan diferentes técnicas dentro de las que se encuentra el uso de los sensores suaves (SS), en esta técnica se aprovechan los parámetros medidos en otros procesos a través de los cuales se puede predecir otro no medido directamente. Se utilizan diferentes tipos de modelos matemáticos según la complejidad y las características de la relación entre los parámetros directamente medidos y los parámetros estimados con el SS (Chowdhury 2015, Kadlec et al., 2008, Kaneko y Funatsu 2016, Liu 2016, Mansano et al., 2014).

De esta manera los SS son utilizados para complementar las mediciones de instrumentos en línea, la supervisión y el control del proceso. Hay dos tipos diferentes de SS, basados en modelos matemáticos y basados en datos:

- ❖ Los SS basados en modelos matemáticos existentes (Model-drive); llamados también sensores de caja blanda, permiten conocer el valor de los parámetros no medidos a partir de modelaciones matemáticas. Este tipo de sensores presenta un inconveniente, y es que su desarrollo requiere de un gran conocimiento del proceso, lo cual en muchas ocasiones no se encuentra disponible. Comúnmente se aplica en el diseño y planificación de las instalaciones para procesos industriales (Lin et al., 2007, Kadlec et al., 2009).
- ❖ Los SS basados en datos (Data-drive) utilizan las mediciones reales que son registradas, almacenadas y proporcionadas como datos históricos. Es un modelo inferencial desarrollado a partir de observaciones de procesos. Son más útiles para monitorear, controlar y mejorar el desempeño del proceso (Wang et al., 2010). En procesos simples,



## PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA

un análisis de regresión es a menudo suficiente (Lin et al., 2007, Kadlec et al., 2009).

Para los sistemas complejos en los que los mecanismos del proceso no se comprenden completamente, se utilizan modelos empíricos (es decir, redes neuronales o análisis de regresión múltiple) para derivar la correlación entre variables (Wang et al., 2010).

Existen diferentes enfoques en el desarrollo de SS (Hong et al., 1999, Kalo et al., 2003, Warne et al., 2004, Fortuna et al., 2005, Gomnam y Jazayeri-rad, 2013, Chowdhury et al., 2015). A continuación se describe una metodología general de cuatro pasos (Lin et al., 2007, Kadlec et al., 2009).

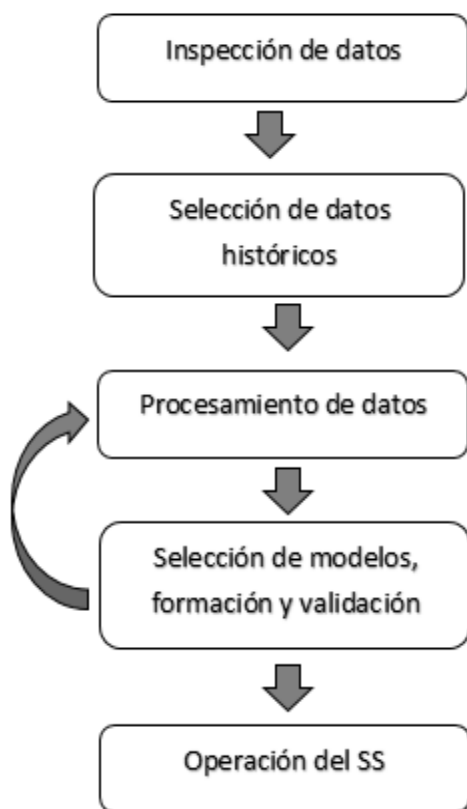


Figura 6.9. Metodología de SS. Adaptado de (Lin et al., 2007, Kadlec et al., 2009).

Paso 1. Inspección de datos: Se desarrolla una inspección de los datos con el fin de obtener una visión global de su estructura, se evalúan los requisitos para la complejidad del modelo, disponibilidad, tendencia, precisión y finalmente se define una variable objetivo para

## PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA

definir qué modelo de regresión es necesario ya sea un modelo de regresión simple, de regresión compleja o red neuronal.

Paso 2. Selección de datos históricos: Se seleccionan los datos a utilizar para la formación y evaluación del modelo, se identifican y seleccionan las partes estacionarias de los datos y se seleccionan los datos aleatorios que serán utilizados para desarrollar el modelo.

Paso 3. Procesamiento de datos: El procesamiento de los datos requiere una gran cantidad de trabajo manual y conocimiento experto sobre el proceso subyacente. Su objetivo es identificar los datos faltantes, seleccionar las variables importantes del proceso y detectar retrasos entre las variables particulares y manejo de datos atípicos. Es un paso que se realiza de manera iterativa después de la normalización, eliminación y selección de las características que se aplican repetidamente hasta que los datos se consideran listos para ser utilizados en la evaluación del modelo real.

Paso 4. Selección de modelos, formación y validación: Una buena selección del modelo define el rendimiento del SS. Como no existe un enfoque teórico unificado, por lo general el tipo de modelo y sus parámetros se seleccionan específicamente de acuerdo a la característica del SS. Una posible aproximación es comenzar con un modelo o estructura simple, ejemplo, modelos de regresión lineal y si es necesario aumentar gradualmente la complejidad hasta observar una mejora significativa del modelo que se evalúa (Friedman et al., 2001).

En ocasiones se pueden presentar inconvenientes a la hora de obtener suficiente cantidad de datos históricos para el desarrollo del modelo. Existen varias herramientas que se utilizan para este fin, el enfoque más aplicado es el Mean Squared Error, que cuantifica la distancia media cuadrada entre el pronóstico y el valor correcto. También se suele aplicar la representación visual de las predicciones, aunque este tipo de método visual depende del criterio subjetivo del

## PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA

desarrollador del modelo (Fortuna et al., 2007).

Muchos de los autores de libros sobre técnicas de selección y validación de modelos recomiendan la necesidad de la aplicación del conocimiento del proceso durante la fase del desarrollo del SS para obtener mejores resultados (Fortuna et al., 2007).

Los SS suelen aplicarse en diferentes tipos de industrias, dentro de las cuales pueden citarse: industrias metalúrgicas, de la construcción entre otras. Una de sus principales aplicaciones es la monitorización de procesos para detectar desviaciones de las condiciones de operación estándar ayudando a identificar las causas. Thanayankizil et al. (2013) documentan el uso de SS para estimar la tasa de ocupación en habitaciones de un edificio de oficinas para mejorar la gestión de la energía. Li et al. (2014) desarrollaron un sistema SS para evaluar la carga de enfriamiento dinámico en tiempo real a partir de las diferentes temperaturas de referencia medidas con precisión por termómetros, utilizando para ello un sistema de ecuaciones que relacionaban directamente las variables medidas con variables medias. Este autor refiere en su estudio que se necesita seguir profundizando en esta temática para lograr una mayor implementación de los sensores suaves. Ploennigs et al. (2011) reportan una investigación, en la que se propone un modelo basado en SS capaz de evaluar el consumo de calor de un edificio utilizando datos de diferentes sensores de temperatura. El estudio muestra cómo el uso de la SS permite garantizar el confort térmico, mediante la optimización brindando una mayor eficiencia y reduciendo costos.

Hadid et al. (2014) describen la aplicación de SS para la medición del flujo de gas combustible consumido por una caldera industrial de 750 kW en Francia. Evalúan un modelo de variación lineal con presión y temperatura como variables de control y un modelo no paramétrico gaussiano para representar el flujo másico de gas, Se utiliza la señal de temperatura y presión en

## PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA

la válvula solenoide obteniendo muy buenos resultados con un error relativo de sólo el 3,5%.

También en calderas industriales Qi et al. (2015) desarrollan un sensor suave basado en un modelo de control predictivo para evaluar y controlar la calidad del vapor. Estos sensores suaves se basan en el cálculo de balance de masa del flujo total del agua de alimentación de la caldera y el flujo de purga de vapor. Los resultados muestran la posibilidad de medir y controlar la calidad del vapor en tiempo real con la consiguiente reducción de la intensidad energética. Otras aplicaciones de los sensores suaves en calderas determinan la calidad del combustible basándose en los datos medidos en los gases de salida (Zhao et al., 2015; Kortela y Jämsä-Jounela, 2012).

Najar et al. (2015) desarrollan un sensor suave para monitorear el rendimiento térmico de los transformadores de electricidad y el balance energético entre baja y media tensión en las subestaciones a través de los datos medidos por un medidor inteligente instalado en baja tensión, todos los datos medidos son obtenidos por un SS creado a partir del modelado matemático y térmico de los transformadores.

Mansano et al. (2014) proponen un sensor suave en una red inalámbrica cuyo objetivo es generar datos virtuales para el control de velocidad múltiple, superando las restricciones del período de muestreo y obteniendo de esta manera un mayor rendimiento.

Lin et al. (2007) presentan un enfoque sistemático fundamentado en técnicas estadísticas robustas para el desarrollo de un sensor suave basado en datos, el cual es un componente importante de la tecnología analítica de proceso. Esta metodología fue llevada a cabo en un horno de cemento para la estimación de variables relacionadas con la calidad del producto y la calidad de emisiones, obteniendo como resultado la efectividad del marco sistemático para la proporción de predicciones confiables.

Wang et al. (2010) presentan una nueva tecnología de sensores suaves impulsados por

## PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA

datos basado en la regresión de mínimos cuadrados parciales para la predicción de calidad en un proceso de refinación desarrollado en la industria petroquímica.

Leonow y Mönnigmann (2014) reemplazaron un costoso sistema de medición de caudal en bombas radiales de baja velocidad para una unidad de control automático utilizando una SS para la estimación en línea del caudal basado en el método de la curva de límite.

Järvisalo et al. (2016) informan de la aplicación de sensores suaves para ahorrar electricidad en compresores de aire, monitoreando el consumo de energía específico en tiempo real. Los sensores suaves estiman el flujo de aire basado en los datos utilizados por los bucles de control (es decir, la presión del sistema, la velocidad de rotación y el par del eje del motor).

Como se muestra en los ejemplos mencionados con anterioridad, los SS han sido implementados exitosamente en la gestión de la energía y el desempeño energético, evaluando diferentes tecnologías e instalaciones (Velázquez et al., 2013).

### **6.4. Pruebas estadísticas y software utilizado**

El análisis de varianza (ANOVA) es la técnica central en el análisis de datos experimentales. La idea general de esta técnica es separar la variación total en las partes con las que contribuye cada fuente de variación en el experimento; es una técnica estadística que señala si dos variables (una independiente y otra dependiente) están relacionadas en base a si las medias de la variable dependiente son diferentes en las categorías o grupos de la variable independiente. Es decir, señala si las medias entre dos o más grupos son similares o diferentes. Este es un factor donde solo se relacionan dos variables: una variable dependiente (o a explicar) y una variable independiente (que en esta técnica se suele llamar factor (Tang, Congedo, & Abgrall, 2016). La variable dependiente es cuantitativa (escalar) y la variable independiente es categórica (nominal u ordinal). Se pide que las variables sigan la distribución normal; también que las varianzas (es

## PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA

decir, las desviaciones típicas al cuadrado) de cada grupo de la variable independiente sean similares (Luo, Lu, & Xu, 2014).

Al aplicar ANOVA de un factor se calcula un estadístico o test denominado F y su significación. El estadístico F o F-test se obtiene al estimar la variación de las medias entre los grupos de la variable independiente y dividirla por la estimación de la variación de las medias dentro de los grupos (Morando, Jemei, Hissel, Gouriveau, & Zerhouni, 2017). El cálculo del estadístico F consiste en dividir la variación entre los grupos por la variación dentro de los grupos. Si las medias entre los grupos varían mucho y la media dentro de un grupo varía poco, es decir, los grupos son heterogéneos entre ellos y similares internamente, el valor de F será más alto, y por tanto, las variables estarán relacionadas (Climaco-Pinto, Barros, Locquet, Schmidtke, & Rutledge, 2009). En conclusión, cuanto más difieren las medias de la variable dependiente entre los grupos de la variable independiente, más alto será el valor de F. Si se realizan varios análisis de ANOVA de un factor, aquel con F más alto indicará que hay más diferencias y por tanto una relación más fuerte entre las variables. La significación de F se interpretará como la probabilidad de que este valor de F se deba al azar. Siguiendo un nivel de confianza del 95, cuando la significación de F sea menor de 0,05 es que las dos variables están relacionadas.

En el presente trabajo se utilizó ANOVA para evaluar la influencia de los diferentes factores que afectan el consumo de energía en la unidad de carga de baterías, dentro de estos se encuentran: la influencia del transformador a que están conectados los circuitos de formación, influencia de factores asociados al personal de trabajo dentro de este los Turno de trabajo, la hora de inicio de los procesos y la Falta de entrenamiento del personal y los Factores tecnológicos, todo el procesamiento se realizó mediante la utilización del programa Statgraphics.

### 7. Capítulo 3: Implementación de la metodología y análisis de los resultados

Esta investigación sigue el procedimiento establecido en la ISO 50001 (ISO, 2011), explicado en el epígrafe 6.2 específicamente la etapa de planificación energética, se comienza realizando un análisis del consumo de energía desde el año 2011 al 2014, posteriormente se analizan las áreas con mayor consumo energético y las variables que afectan el mismo, se establece la línea base, una línea meta y un indicador que permita hacer una mejor gestión en el consumo de energía. A partir de estos análisis se identifican las oportunidades de ahorro y se establece un plan de acción para disminuir el consumo de energía en el proceso de carga de baterías.

#### 7.1. Consumo de energía pasado y presente

La planta ha incrementado su producción a una tasa de 14% anual desde 2012 (742.600 baterías) a 2015 (1.110.900 baterías). En la investigación se analizaron los datos del consumo y la producción de los años 2011 a 2014; las medidas se implementaron a principios de 2015 año en que se evalúan los resultados como se ilustra en la figura 7.1.

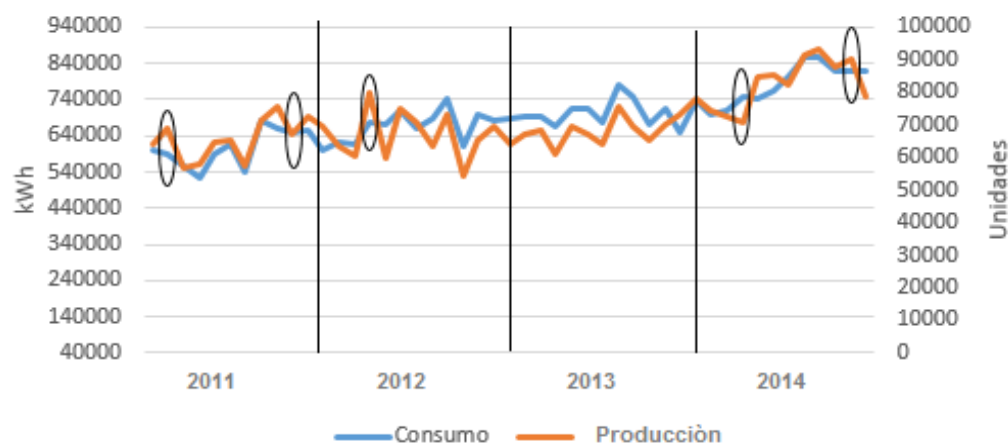


Figura 7.1 Comportamiento mensual de la producción y el consumo de electricidad 2011-2014. Elaboración propia

## PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA

Como es de esperar el consumo de energía ha tenido un comportamiento ascendente acorde con la producción por lo que la mejora de la eficiencia energética es de gran importancia debido a su incidencia en los costos de producción.

Se identifican cinco meses con un comportamiento no proporcional entre el consumo de electricidad y la producción de baterías. En febrero de 2011, mayo de 2012 y noviembre de 2014 aumenta la producción de baterías y no aumenta proporcionalmente el consumo eléctrico mientras que en noviembre del 2011 y marzo del 2014 sucede lo contrario, baja la producción sin una reducción proporcional del consumo eléctrico. Esto estuvo ocasionado por unas producciones atípicas para la planta con el objetivo de responder a necesidades del mercado. en los primeros tres casos se produjeron mayoritariamente los modelos de baterías de menor capacidad lo que conlleva a que se produzcan más unidades, pero no se consume gran cantidad de energía en el proceso de carga mientras que en los 2 meses restantes se fabricaron las de mayor consumo ocasionando un efecto contrario.

### **7.2. Identificación de las áreas con uso significativo de la energía**

Para la determinación de las áreas de uso significativo de la energía se midió simultáneamente el consumo de electricidad general de la planta y de las áreas y equipos que presuntamente tenían el mayor consumo a través de dos analizadores de redes portables uno marca Fluke modelo 435 II clase A y el otro Dranetz Power Visa. La UFB y dentro de ella las mesas de carga consumen alrededor de 480 MW-h mensuales lo que representa algo más que el 50 % del consumo eléctrico total de la fábrica como se observa en la figura 7.2.



## PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA

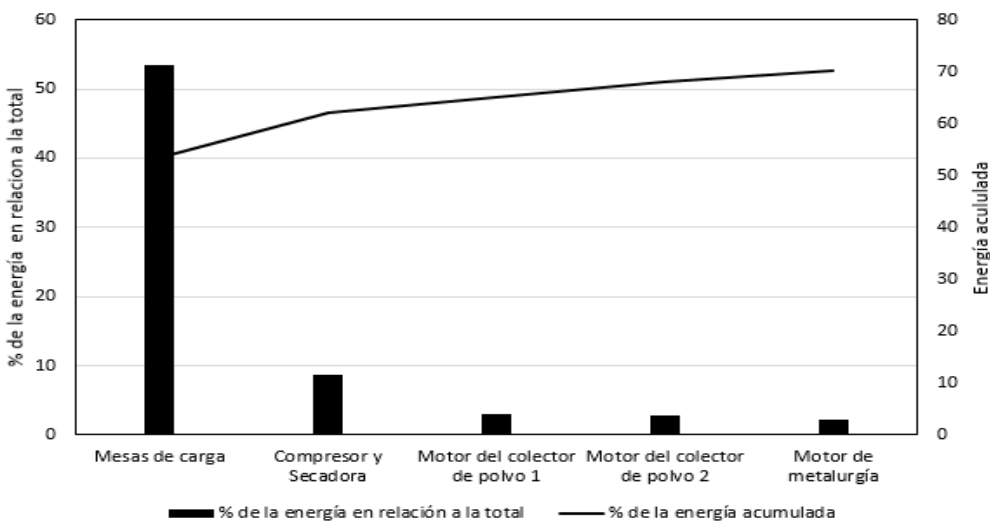


Figura 7.2 Diagrama de Pareto del consumo eléctrico por área. Elaboración propia

Esta cuenta con 17 mesas de carga con 12 circuitos cada una, cada circuito tiene capacidad para 18 baterías. La formación de baterías se realiza en lotes de 108 baterías cada vez en seis circuitos de una misma mesa de carga. El suministro de electricidad es independiente para cada circuito y se realiza a través de un rectificador CA / CD con una entrada nominal de 280 V AC y una salida de 324 V CD, la corriente máxima es de 130 A. Las baterías se conectan en serie para la carga como se puede apreciar en figura 7.3.

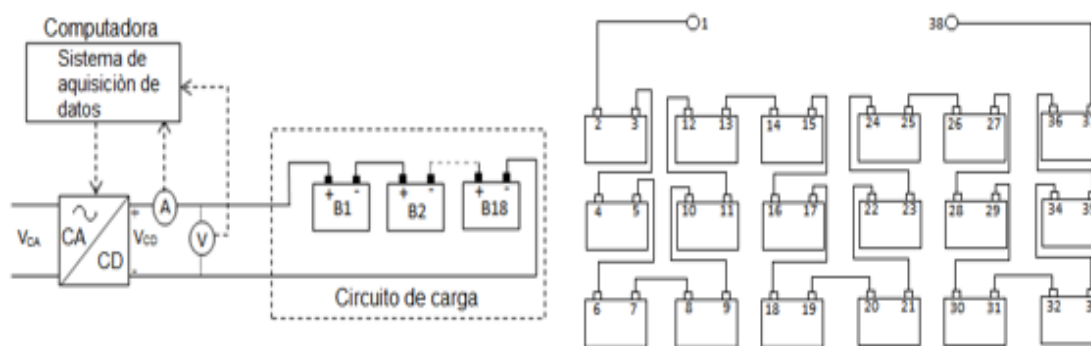


Figura 7.3 Circuito de carga de baterías. Elaboración propia

El proceso es controlado por una computadora que permite establecer el patrón de tensión y corriente requeridos y registra sus principales parámetros cada un segundo. El patrón de

## PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA

formación que se sigue es el régimen de carga intermitente explicado en el epígrafe 5.5.5. La carga máxima a acumular en las baterías (Ah) se fija según el modelo y cuando se alcanza ese valor la computadora concluye el proceso, como se muestra en la figura 7.4.

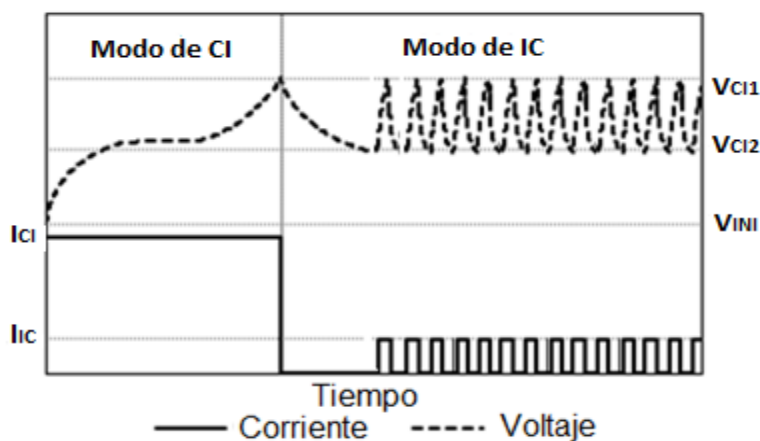


Figura 7.4 Patrón de corriente y la tensión en el régimen de carga intermitente. Adaptado de (Wong et al., 2008)

### 7.3. Obtención de la línea base energética y la línea meta

Se realizó un análisis de correlación entre el consumo de electricidad y la producción de baterías mensual desde el año 2011 hasta el 2014 mostrados en la tabla 7.1, para la obtención de la línea base energética (LBe), los resultados se muestran en la figura 7.5.

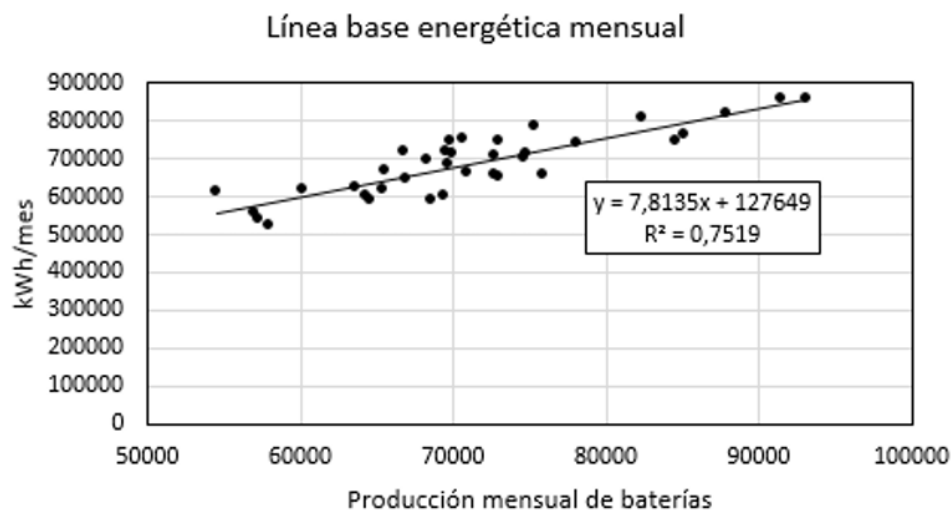


Figura 7.5 Línea base energética. Elaboración propia

## PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA

Tabla 7.1

*Datos de producción de baterías y consumo de energía mensual en el período (2011-2014).*

Mes	Producción (Baterías)	Consumo (kWh/mes)
mar-11	64361	601867,68
abr-11	68676	589822,32
may-11	56972	556325,65
jun-11	58007	523344,96
jul-11	64629	587175,36
ago-11	65419	616947,96
sep-11	57321	541404,44
oct-11	71254	681070
nov-11	75938	658452,12
dic-11	67025	647108,08
ene-12	72781	654273,24
mar-12	69372	601867,68
abr-12	63668	621912,72
may-12	60230	615596,64
jun-12	79972	679277,52
jul-12	60088	671159
ago-12	74761	710800,68
sep-12	70905	661887,96
oct-12	63370	690446,28
nov-12	73059	744329,16
dic-12	54486	611573,88
ene-13	65165	701241,36
feb-13	69759	682715,64
mar-13	64294	689803,82
abr-13	67208	694230,36
may-13	68306	694230,36
jun-13	61171	667855,92
jul-13	69623	715302,6
ago-13	66854	715302,6
sep-13	64114	674623,08
oct-13	75387	782258,99
nov-13	69832	747345,24
dic-13	65584	669950,19
ene-14	70042	713881,36
feb-14	73057	651945,28
mar-14	78190	738945,28

## PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA

abr-14	74706	698372,88
may-14	72719	708082,1
jun-14	70626	750235,44
jul-14	84632	742446,48
ago-14	85136	764600,88
sep-14	82436	804711,72
oct-14	91573	855143,28
nov-14	93205	855143,28
dic-14	87895	818602,80

*Nota:* Elaboración propia

Según la literatura especializada para análisis de este tipo basados en datos reales operacionales si el coeficiente de determinación ( $R^2 > 0,6$ ) el modelo puede ser aplicado como línea base y en la construcción de un IDEn con buenos resultados y si es mayor de 0,8 son de esperar muy buenos resultados. (Deng, 2003; Matson & Piette, 2005; Becken et al., 2001; Bohdanowicz & Martinac, 2007; Castrillón et al., 2013; Yanes & Gaitan, 2005).

En la figura 7.5 se muestra el resultado del análisis de correlación realizado para obtener la línea base, el estadístico  $R^2$  indica que el modelo ajustado explica 75% de la variabilidad del consumo eléctrico con la cantidad de baterías producidas, el valor-P en el análisis de varianza fue de 0,0004 para la estimación de la pendiente y de 0,0001 para la estimación del intercepto, ambos menores que 0,05 lo que indica que existe una relación estadísticamente significativa entre el consumo de electricidad y la cantidad de baterías producidas con un nivel de confianza del 95%.

La ecuación de correlación lineal de la LBe obtenida tiene un coeficiente de determinación  $R^2 = 0,7519$ , mayor que 0,6 por lo que según la literatura especializada (Matson & Piette, 2005) la relación entre las baterías producidas y el consumo de electricidad puede ser útil para construir un IDEn y la ecuación de la línea base es aplicable para la planificación y evaluación del consumo de energía eléctrica.

## PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA

Lograr que la tendencia predominante en el consumo eléctrico tenga un comportamiento similar a los puntos que están por debajo de la LBe constituye una meta razonable y alcanzable. De igual manera, los puntos por encima de la LBe permitirán estimar cuanto puede deteriorarse el desempeño energético si no se toman acciones en las condiciones actuales de la planta. En la figura 7.6 se puede apreciar la línea meta (LMe) obtenida a partir de los puntos que presentan mejor desempeño que la LBe y la línea de deterioro obtenida de los puntos de desempeño energético que están por encima de la LBe, tendiendo a afectar la EE y desmejorar el desempeño.

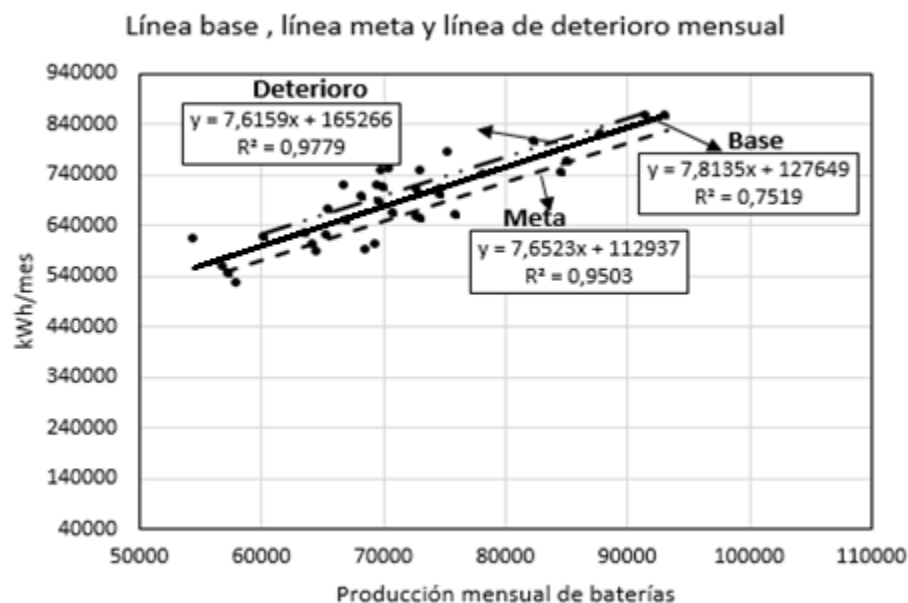


Figura 7.6. Línea base, meta y de deterioro. Elaboración propia

La línea base energética (LBe) sirve de referencia para evaluar avances y retrocesos en el desempeño energético organizacional. El potencial de ahorro sin modificaciones en el equipamiento se determina por la diferencia entre el área bajo la recta de la LBe y el área bajo la recta de la LMe. Este es del 8% respecto al consumo actual, lo que permitiría el ahorro de 75.200 kWh anuales. El deterioro posible se determina de igual forma y resulta de un 13 %.

## PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA

Para realizar el control diario, se obtuvo la línea base energética diaria con los datos obtenidos en el mes de junio de 2015. En la figura 7.7 se muestra la línea de base energética diaria, esta se obtuvo con los datos de la tabla 7.2 filtrando los datos que estuvieran fuera del patrón de la mayoría, tal como se hizo con la línea de base mensual.

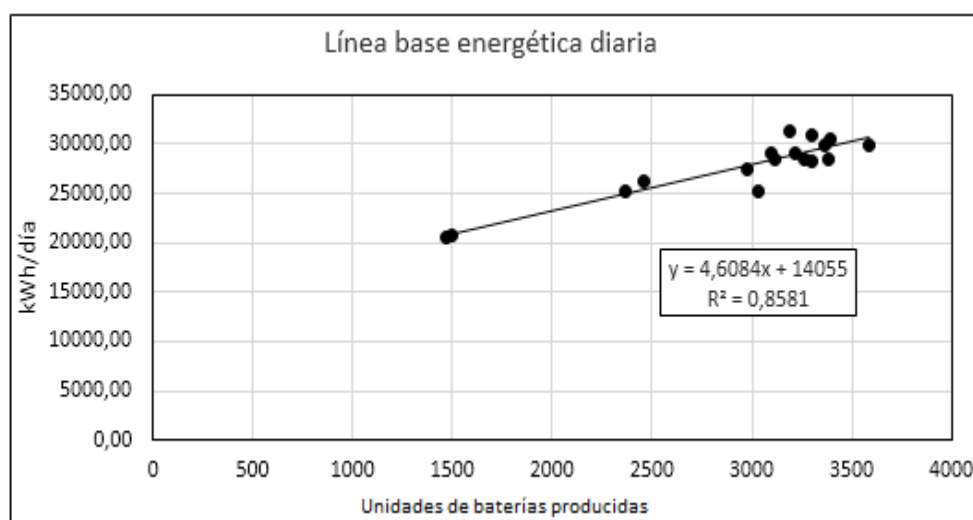


Figura 7.7. Línea base energética diaria. Elaboración propia

Tabla 7.2

Datos de producción de baterías y consumo de energía diaria en el mes de junio de 2015.

Día	Producción (Baterías)	Consumo (kWh/día)
1	1471	20631,96
2	1497	20706,72
3	2365	25228,56
4	3301	30841,92
5	3395	30483,24
6	3214	29136,96
7	3128	23309,76
8	3181	27095,16
9	2756	29457,84
10	3831	28980,84
11	3364	29783,28

## PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA

12	3052	28028,52
13	3499	28261,32
14	2458	26292,24
15	3389	27536,28
16	3193	31276,56
17	3119	28385,40
18	3023	30645,36
19	3010	29210,64
20	3484	28069,68
21	3096	26528,40
22	3327	27302,28
23	2973	27405,96
24	3383	28531,80
25	3588	29783,04
26	3300	28159,68
27	3036	25261,56
28	3361	25474,08
29	3264	28486,80
30	3095	29039,52

Nota: Elaboración propia

En la figura 7.8 se puede apreciar la LMe obtenida a partir de los puntos que presentan mejor desempeño que la LBe y la línea de deterioro obtenida de los puntos de desempeño energético que están por encima de la LBe, tendiendo a afectar la EE y desmejorar el desempeño.

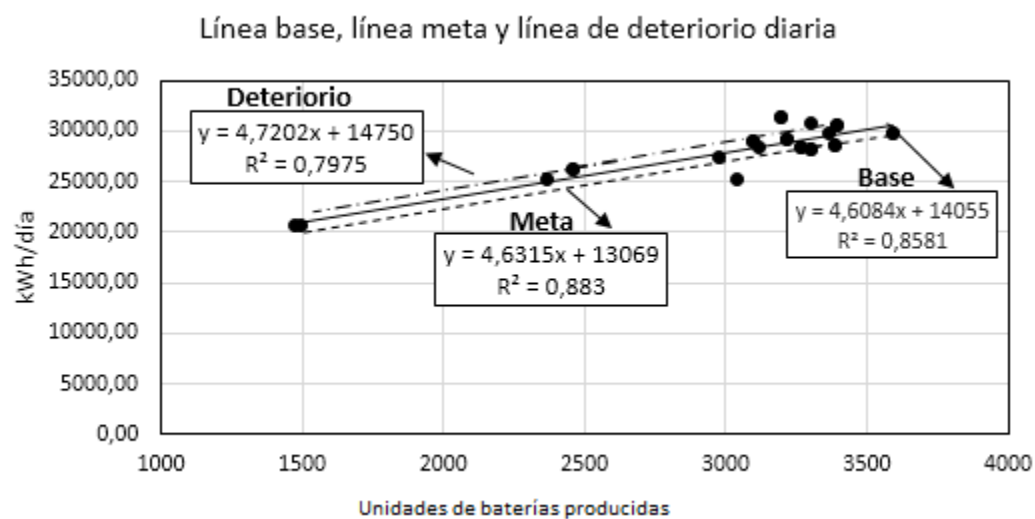


Figura 7.8. Línea base, meta y de deterioro. Elaboración propia

## PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA

Como las baterías tienen diferentes capacidades según cada surtido, se evalúa la introducción del concepto de Producción Equivalente (Alan P. Rossiter, 2015) que en este caso se calcula por la ecuación 5 y consiste en multiplicar la producción de los otros tipos de baterías por el factor  $k_b$ , ecuación 5, que se obtiene de dividir los amperes hora (Ah) utilizados en la formación de cada batería entre los amperes Ah de la batería de menor consumo considerando esta como la batería base.

$$k_b = \frac{Ah_b}{Ah_{bb}} \quad (5)$$

Donde;

$Ah_b$ : amperes hora utilizados en la formación de cada tipo de batería

$Ah_{bb}$ : amperes hora utilizados en la formación de la batería de menor consumo o batería base.

En la tabla 7.3 se presentan algunos tipos de baterías que se producen en la empresa, los amperes hora y los respectivos coeficientes  $k_b$ .

Tabla 7.3

*Consumo de energía en Ah durante la producción de las baterías con el respectivo factor kb.*

Tipo de batería	Ah	kb
L2 24B-440 DFS	135	1,0
L2 24B-440	135	1,0
NS 60 NS-60 510	138	1,02
22NF · 22NF/NS40-400 DFS	157	1,16
L2 24B-500	160	1,19
NS60 · NS60-440 DFS	193	1,43
24 A 24A-550 DFS	210	1,56
L3 34-750 DFS	223	1,65
L3 48-800	245	1,81
L3 · 34-950/1000 DFS	270	2,0
24A · 24A DFS	280	2,07
55D · 55D-700 CCA DFS	300	2,22
N100 · N100-950	345	2,56
27A · 27A CCA DFS	400	2,96



## PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA

4D · 4DT-1400dfs	550	4,07
8D · 8DT-1500dfs	670	4,96

Nota: Elaboración propia

En la figura 7.9 se muestra la línea base energética diaria obtenida para el mismo período que el representado en la figura 7.8. La diferencia en este caso es que se utiliza la batería equivalente como variable de producción. En la tabla 7.4 se presentan los datos utilizados

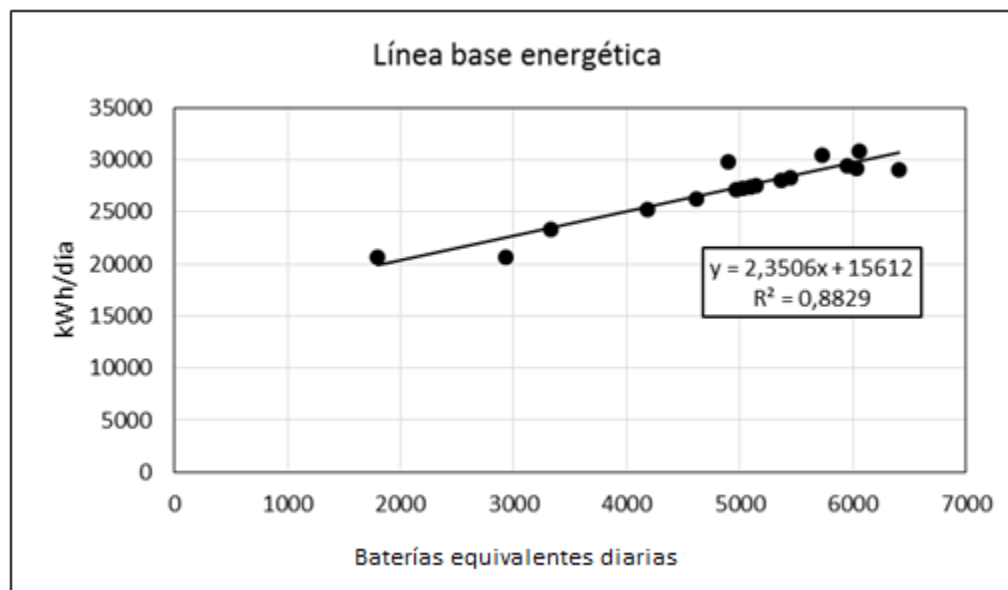


Figura 7.9. Línea base energética diaria empleando batería equivalente. Elaboración propia

Tabla 7.4

*Datos de producción de baterías, batería equivalente y consumo de energía diaria en el mes de junio de 2015.*

Día	Producción (Baterías)	Producción (Batería equivalente)	Consumo (kWh/día)
1	1471	1798,12	20631,96
2	1497	2931,8	20706,72
3	2365	4178,80	25228,56
4	3301	6061,65	30841,92
5	3395	5730,9	30483,24
6	3214	6035,13	29136,96
7	3128	3332,01	23309,76
8	3181	4963,37	27095,16

## PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA

9	2756	5955,11	29457,84
10	3831	6413,69	28980,84
11	3364	4894,57	29783,28
12	3052	5363,68	28028,52
13	3499	5442,78	28261,32
14	2458	4615,59	26292,24
15	3389	5144,15	27536,28
16	3193	6720,30	31276,56
17	3119	5513,60	28385,40
18	3023	6457,61	30645,36
19	3010	5873,88	29210,64
20	3484	5388,20	28069,68
21	3096	4732,12	26528,40
22	3327	5031,54	27302,28
23	2973	5101,67	27405,96

*Nota:* Elaboración propia

En la figura 7.9 se observa que usando la batería equivalente como variable de producción, se obtiene una mejor correlación que la línea base de la figura 7.8.

#### **7.4. Construcción del Indicador para la UFB.**

Para la elaboración del indicador se recopiló la información, entre el 1ro de Octubre y el 17 de Noviembre de 2014, del registro informatizado, 2902 procesos de formación fueron analizados, lo que incluye a 204 circuitos en todas las mesas (solo no se efectuaron mediciones del circuito 27). En la figura 7.10 se muestra el gráfico de la cantidad de mediciones realizadas a cada circuito en el que se puede apreciar que se realizaron más de 5 mediciones a todos los circuitos con un promedio de 14,3 mediciones por circuito.

## PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA

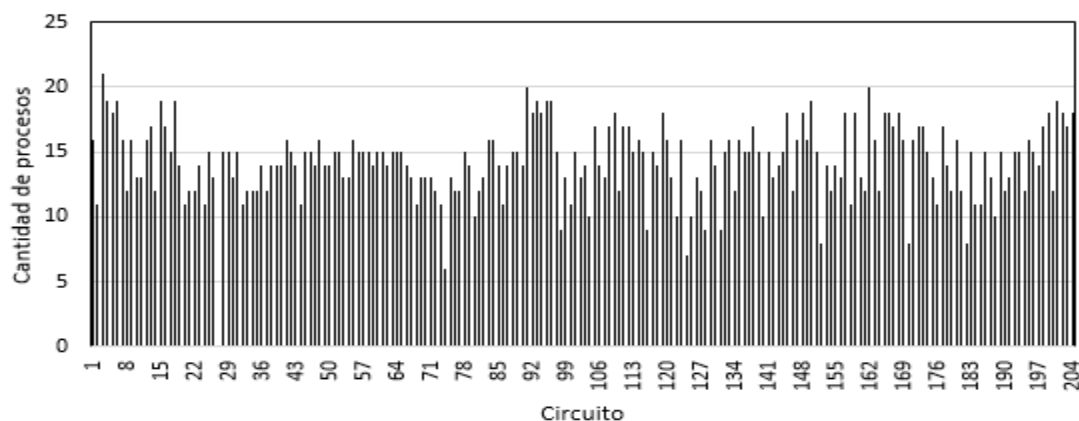


Figura 7.10. Cantidad de mediciones realizadas por circuitos. Elaboración propia

En el estudio se analizaron procesos de formación de 168 tipos de baterías (algunas se incluyen dos veces al tener categoría de reposición o descarga, en la tabla 7.5 se pueden apreciar estos y la cantidad de procesos de formación evaluados para cada uno.

Tabla 7.5

*Tipos de baterías y cantidad de procesos de formación para cada uno*

Tipo de batería	NoProc	Tipo de batería	NoProc
22NF · 22NF/NS40 - 560	22	31H · 31H-1000 (Reposición).	1
22NF · 22NF/NS40-400 DFS	16	31H · 31H-1100	4
22NF · 22NFS/NS40-560 DFS	42	31H · 31H-1100 (REP - Reposición).	1
24A · 24A-550	13	31H · 31H-1100-Poste DFS	75
24A · 24A-800 DFS	19	31H · 31H-1100-Poste DFS (DES - Descarga).	5
24A · 24AS-600	3	31H · 31H-1225-Poste EBG DFS	2
24A · 24AS-600 DFS	3	31H · 31H-880	1
27A · 27A CCA (CCA - Mazda)	3	31H · 31H-880-Poste DFS	70
27A · 27A CCA DFS	4	31H · 31H-880-Poste EBG DFS	11
27A · 27A-1000	18	31H · 31H-EBG DFS	1
27A · 27AS-850 DFS	27	31H · 31H-EBG DFS	2
27A · 27AS-900 / 27-1000	6	31H · 31H-EBG DFS	3
27A · 27AS-900 /27-1000 DFS	4	31H · 31H-EBG DFS	4

## PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA

27A · 27AS-900 /27-1000 DFS	5	31H · 31H-EBG DFS	5
31H · 31H-1100	6	31H · 31H-EBG DFS	6
31H · 31H-1100-Poste DFS	44	31H · 31H-EBG DFS	7
31H · 31H-1225-Poste EBG DFS	4	31H · 31H-EBG DFS (DES - Descarga)	5
31H · 31H-880-Poste DFS	21	31H 31H-880-Poste DFS	22
31H · 31H-880-Poste EBG DFS	5	4D · 4DT-1300 Esbic DFS	4
4D · 4DT-1300 Esbic DFS	7	4D · 4DT-1300dfs	33
4D · 4DT-1400dfs	13	4D · 4DT-1300dfs (DES - Descarga).	1
4DB · 4DBT-1350Esbic DFS	3	4D · 4DT-1400dfs	41
55D · 55D-700 CCA DFS	1	4D · 4DT-1400dfs (DES - Descarga).	5
55D · 55D-700 DFS	5	4D 4DT-1300 dfs	2
65 · 65-1000 DFS	4	4DB · 4DBT-1350 DFS	3
8D · 8D 1500esbic DFS	2	4DB · 4DBT-1350 DFS (DES - Descarga).	1
8D · 8DT-1500dfs	2	4DB · 4DBT-1350Esbic DFS	17
L1 · 36-600	11	4DB · 4DBT-1350Esbic DFS (DES - Descarga).	3
L1 · 36-600 DFS	25	55D · 55D-700 CCA DFS	2
L1 · 36-601	2	55D · 55D-700 CCA DFS (CCA - Mazda)	3
L1 · 99-350 DFS	2	65 · 65-1000 DFS	9
L2 · 24B-440	24	65 · 65-1000 DFS (DES - Descarga)	1
L2 · 24B-440 DFS	28	65 · 65-1000 EBG	2
L2 · 24B-500	47	65 · 65-1000 EBG DFS	26
L2 · 24B-500 DFS	32	65 · 65-1000 EBG DFS (DES - Descarga)	5
L2 · 24B-600 /42-680	7	65 · 65-875 (REP - Reposición)	1
L2 · 24B-600 /42-680 DFS	24	65 · 65-875 EBG DFS	17
L2 · 24B-650	38	8D · 8DT-1500 EBG DFS	5
L2 · 24B-650 DFS	6	8D · 8DT-1500dfs	11
L2 · 24B-700 / 42-700	11	L1 · 36-600 DFS	31
L2 · 24B-700/42-700 DFS	27	L1 · 99-350 (REP - Reposición)	3
L2 · 24B-720 / 42-720	28	L1 · 99-350 DFS	2
L2 · 24B-720/42-720 DFS	39	L2 · 24B-440	22
L2 · 24BST-700	12	L2 · 24B-440 (REP - Reposición)	25
L2 · 24BST-700 DFS	11	L2 · 24B-440 DFS	113
L3 · 34 – 750	20	L2 · 24B-500	62

## PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA

L3 · 34-750 DFS	1	L2 · 24B-500 DFS	16
L3 · 34-950 / 34-1000	10	L2 · 24B-500 (REP - Reposición).	2
L3 · 34-950/1000 DFS	83	L2 · 24B-600 /42-680	3
L3 · 48 -800	15	L2 · 24B-600 /42-680 (REP - Reposición)	5
L3 · 48 800Esbic	9	L2 · 24B-600 /42-680 DFS	7
L3 · 48 880	1	L2 · 24B-600 /42-680 DFS (DES - Descarga)	1
L3 · 48-800 DFS	31	L2 · 24B-600 /42-680 DFS (DES - Descarga)	2
L3 · 48-800 esbic DFS	20	L2 · 24B-600 /42-680 DFS (DES - Descarga)	3
L3 · 48-880 DFS	4	L2 · 24B-600 /42-680 DFS (DES - Descarga)	4
L3 · 48-880 EBG DFS	27	L2 · 24B-650	46
L3 · 48-900	3	L2 · 24B-650 DFS	79
L3 · 48-900 DFS	6	L2 · 24B-700 / 42-700	27
L3 · 48ST-850	1	L2 · 24B-700 / 42-700 (REP - Reposición).	18
L3 · 48ST-850 DFS	17	L2 · 24B-700/42-700 DFS	73
NS60 · NS60 -510	10	L2 · 24B-700/42-700 DFS (DES - Descarga).	16
NS60 · NS60-440 DFS	28	L2 · 24B-720 / 42-720	31
: 4D · 4DT-1300dfs	1	L2 · 24B-720 / 42-720 (REP - Reposición).	5
22NF · 22NF/NS40 - 560	7	L2 · 24B-720/42-720 DFS	39
22NF · 22NF/NS40 - 560 (REP - Reposición)	12	L2 · 24B-720/42-720 DFS (DES - Descarga).	29
22NF · 22NF/NS40-400 DFS	33	L2 · 24BST-700	6
22NF · 22NF-400	8	L2 · 24BST-700 (REP - Reposición).	5
22NF · 22NF-400 (REP - Reposición).	2	L2 · 24BST-700 DFS	28
22NF · 22NFS/NS40-560	6	L2 · 24BST-700 DFS (DES - Descarga).	11
22NF · 22NFS/NS40-560 DFS	82	L2 24B-440	12
22NF · 22NFS/NS40-560 DFS (DES - Descarga)	13	L2 24B-440 DFS	9
22NF 22 NFS/NS 40-560 DFS	27	L2 24B-500	16
24A · 24A CCA DFS	12	L2 24B-500 DFS	13
24A · 24A CCA DFS (CCA - Mazda).	5	L2 24B-700/42-700 DFS	7
24A · 24A DFS	22	L2 24BST-700	1

## PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA

24A · 24A DFS (DES - Descarga).	29	L2 24BST-700/42-700	15
24A · 24A-440	6	L2 24BST-700/42-700 DFS	3
24A · 24A-440 (REP - Reposición)	4	L3 · 34-750 DFS	22
24A · 24A-440 DFS	26	L3 · 34-750 DFS (DES - Descarga)	2
24A · 24A-440 DFS (DES - Descarga).	17	L3 · 34-950 / 34-1000	26
24A · 24A-550	19	L3 · 34-950 / 34-1000 (REP - Reposición).	2
24A · 24A-550 (REP - Reposición).	11	L3 · 34-950/1000 DFS	38
24A · 24A-550 DFS	31	L3 · 34-950/1000 DFS (DES - Descarga).	13
24A · 24A-550 DFS (DES - Descarga)	11	L3 · 34-950/1000 EBG DFS	7
24A · 24A-800 DFS	62	L3 · 48 -800	2
24A · 24A-800 DFS (DES - Descarga).	24	L3 · 48 -800 (REP - Reposición)	3
24A · 24AS-600	6	L3 · 48 800Esbic (REP - Reposición).	9
24A · 24AS-600 (REP - Reposición).	11	L3 · 48 880	1
24A · 24AS-600 DFS	28	L3 · 48 880	2
24A · 24AS-600 DFS (DES - Descarga).	3	L3 · 48 880	3
24A · 24AS-800	32	L3 · 48 880 (REP - Reposición)	17
24A · 24AS-800 (REP - Reposición).	5	L3 · 48-800 DFS	39
24A · 24AS-800 DFS	6	L3 · 48-800 DFS (DES - Descarga)	1
24A · 24AS-800 EBG (REP - Reposición).	6	L3 · 48-800 esbic DFS	22
24A 24A-800 DFS	3	L3 · 48-800 esbic DFS (DES - Descarga).	15
27 A 27 AS-1000 DFS	7	L3 · 48-880 DFS	6
27 A 27A-1000	1	L3 · 48-880 EBG DFS	17
27A · 27-750 (REP - Reposición)	1	L3 · 48-900	10
31H · 31H-1100-Poste DFS	75	31H · 31H-1000 (REP - Reposición).	1
31H · 31H-1100-Poste DFS (DES - Descarga).	5	31H · 31H-1100	4

## PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA

31H · 31H-1225-Poste EBG DFS	2	31H · 31H-1100 (REP - Reposición).	1
31H · 31H-880	1		

*Nota:* Elaboración propia

Para la elaboración del IEE del área de formación de batería se aplicó el concepto de batería equivalente explicando anteriormente (Ver ecuación 5).

Para la validación del IEE se realiza un análisis de regresión entre la energía consumida y las baterías equivalentes formadas en cada proceso y se determina la ecuación de la línea base energética del proceso de formación de baterías. En la figura 7.11 se muestra el resultado del análisis estadístico donde se observa una excelente correlación entre ambas variables  $R^2 > 0,99$  lo que permite confirmar definitivamente la validez del indicador para el control y evaluación de la eficiencia energética en el proceso de formación de baterías. La ecuación de la línea base energética es:

$$\text{Energía consumida} = 4,939 + 2,162 \cdot \text{Batería Equivalente} \quad (6)$$

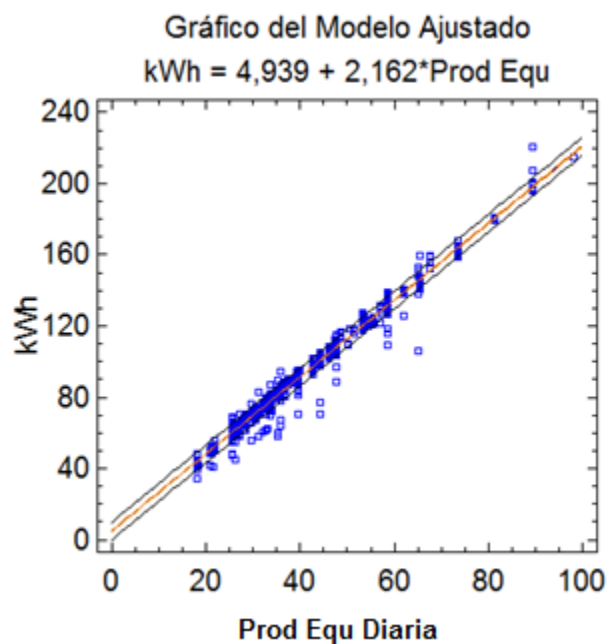


Figura 7.11. Análisis de correlación para validar el IEE. Elaboración propia

## PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA

Esta ecuación permite pronosticar con más de un 99 % de confianza el consumo de energía para cada proceso de formación de baterías que se realice.

El indicador de eficiencia energética se calcula por la ecuación:

$$IEE = \frac{\text{Energía consumida}}{\text{Baterías equivalentes cargadas}} \cdot \left( \frac{\text{kWh}}{\text{BatEquiv}} \right) \quad (7)$$

Este indicador se puede aplicar tanto a la instalación completa en determinado periodo de tiempo como a circuitos independientes, turnos de trabajo, etc.

Con el consumo de energía obtenida a partir de la ecuación de la línea base energética y la producción equivalente, se obtiene la herramienta de control IEE, mostrado en la ecuación 8 y mostrado en la figura 7.12.

El indicador de referencia se obtiene como:

$$IEE_{\text{ref}} = \frac{\text{kWh}_{\text{base}}}{\text{Prod Equ}} = \frac{4,939 + 2,162 \cdot \text{Prod Equ}}{\text{Prod Equ}} \quad (8)$$

$$IEE_{\text{ref}} = \frac{4,939}{\text{Prod Equ}} + 2,162 \quad (9)$$

Donde:

kWh<sub>base</sub>: Ecuación de la línea base energética.

IEE<sub>ref</sub>: Indicador de eficiencia energética de referencia.



## PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA

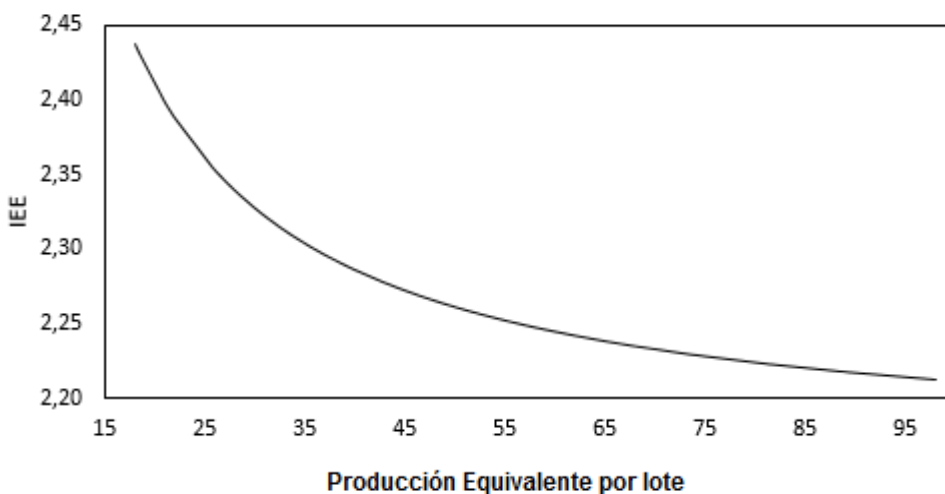


Figura 7.12. Indicador de eficiencia energética de referencia para el control del IEE. Elaboración propia

La herramienta permite ubicar el IEE correspondiente a cada proceso y valorar su comportamiento. Los puntos por debajo del modelo de referencia indican un buen desempeño energético, en cambio, los puntos por encima del modelo representan un desempeño energético no deseado.

### **7.5. Identificación de los factores que afectan el consumo de la energía eléctrica en la UFB**

Para identificar los principales factores que influyen en el consumo energético en el proceso de formación de baterías se partió de los factores señalados por Kiessling (1992) y se realizaron entrevistas con el personal encargado de los procesos y una sesión de trabajo en grupo. Los resultados se resumen en el diagrama de espina de pescado mostrado en la figura 7.13

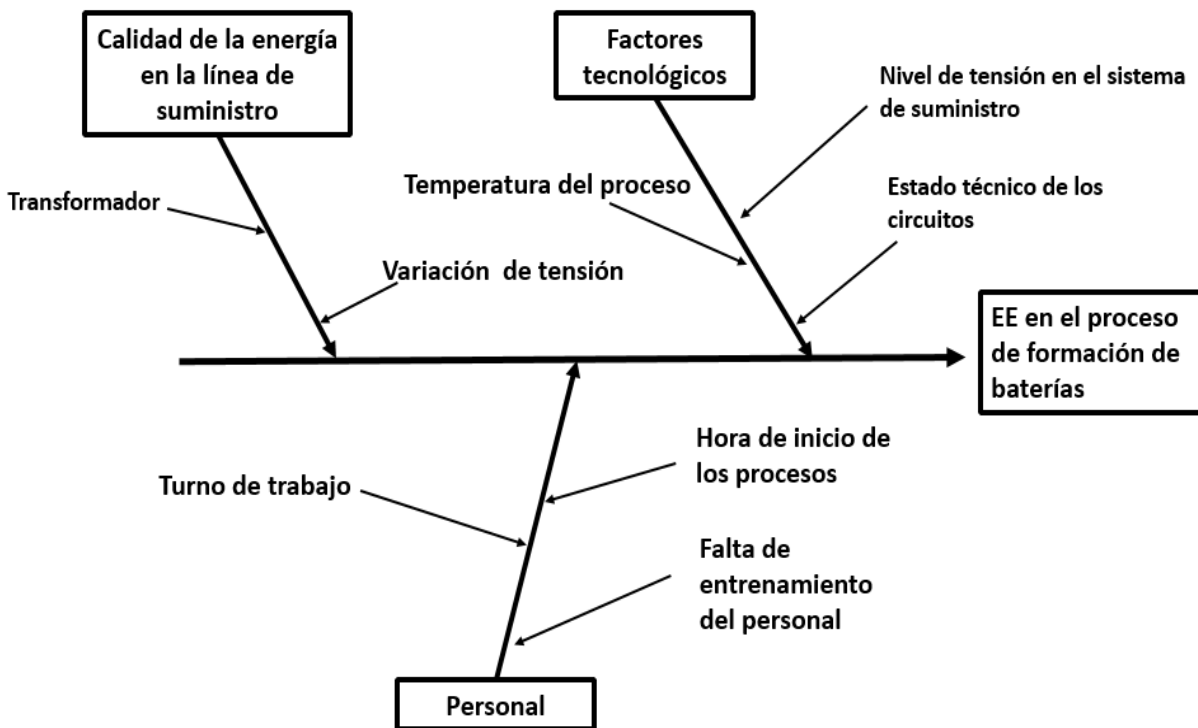


Figura 7.13 Factores que influyen en la EE del proceso de formación de baterías. Elaboración propia

### 7.5.1. Calidad de la energía en la línea de suministro.

#### 7.5.1.1 Evaluación de la influencia del transformador a que están conectados los circuitos de formación.

El suministro eléctrico a los circuitos de carga de baterías se realiza a través de dos transformadores conectados a circuitos independientes que alimentan un grupo de circuitos de carga cada uno. Se realizó una comparación entre los valores del IEE para los procesos realizados en los circuitos conectados a cada transformador, en la tabla 7.6 se presentan los datos nominales de cada transformador.

Tabla 7.6

## PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA

*Datos nominales de los transformadores*

Transformador	1	2
Potencia (kVA)	800	2000
Tensión Primario(kV)	13,2	13,2
Tensión secundario (V)	266/154	282/163
Corriente secundario (A)	1736	4095
Conexión	$\Delta/Y$	$\Delta/Y$
TAP	4	3
		Desde 1 hasta 96
		Desde 181 hasta 204
Circuitos que alimentan	Desde 97 hasta 144	145, 146, 148, 149
	147, 150, 153, 156	151, 152, 154, 155
	159, 162, 165, 168	157, 158, 160, 161
	171, 174, 177, 180	163, 164, 166, 167
		169, 170, 172, 173
		175, 176, 178, 179

*Nota:* Elaboración propia

En la tabla 7.7 se muestra el resumen del análisis de comparación de medias según el transformador de alimentación el cual se orientó a demostrar si existen diferencias estadísticamente significativas entre la media de los valores del IEE para los procesos realizados en los circuitos conectados en cada proceso.

Tabla 7.7

*Resumen del análisis de comparación de medias según el transformador de alimentación.*

Transformador	Recuento	Promedio	Mínimo	Máximo	Rango
1	2042	2,328	1,63	2,6	0,97
2	860	2,326	1,6	2,69	1,09
Total	2902	2,327	1,6	2,69	1,09

*Nota:* Elaboración propia

En la tabla 7.8 se muestran los resultados del análisis de varianza para la comparación entre la influencia de los transformadores de alimentación. Como el valor  $P=0,56$  y es mucho mayor que  $0,05$  se concluye que no existen diferencias estadísticamente significativas entre el

## PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA

desempeño energético de los procesos realizados en los circuitos conectados al transformador 1 y los conectados al transformador 2.

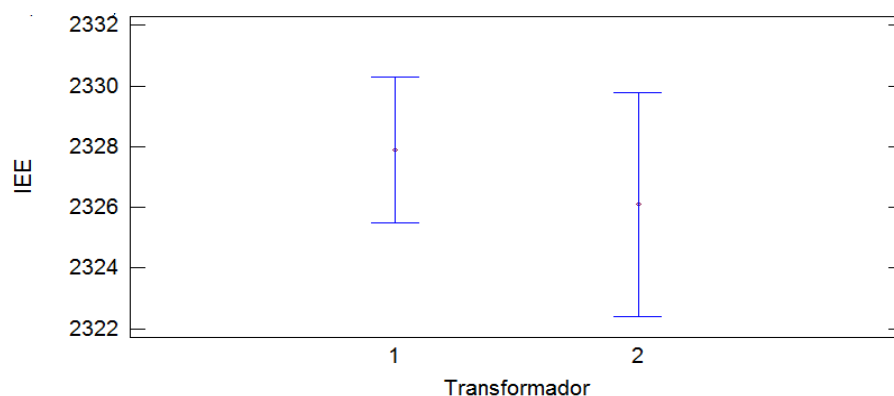
Tabla 7.8

*ANOVA de la comparación de medias del IEE según el transformador de alimentación.*

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	0,001995	1	0,001995	0,32	0,5688
Intra grupos	17,82	2900	0,006146		
Total (Corr.)	17,83	2901			

*Nota:* Elaboración propia

El gráfico de medias mostrado en la figura 7.14 confirma la conclusión anterior. Sin embargo al ser la media del IEE menor se recomienda de ser posible técnicamente conectar todos los circuitos al transformador 2.



*Figura 7.14.* Comparación de medias del IEE según el transformador de alimentación. Elaboración propia

### **7.5.1.2. Variación de tensión.**

Para poder analizar el factor de variación de tensión, se realizó un análisis de calidad de la energía en los dos transformadores que alimentan al área de formación. La figura 7.15 muestra el promedio de las tres tensiones de línea de cada transformador medido durante una semana con un intervalo de registro de 10 min. Se incluyen además los valores máximos, mínimos y

## PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA

promedio de estas tensiones.

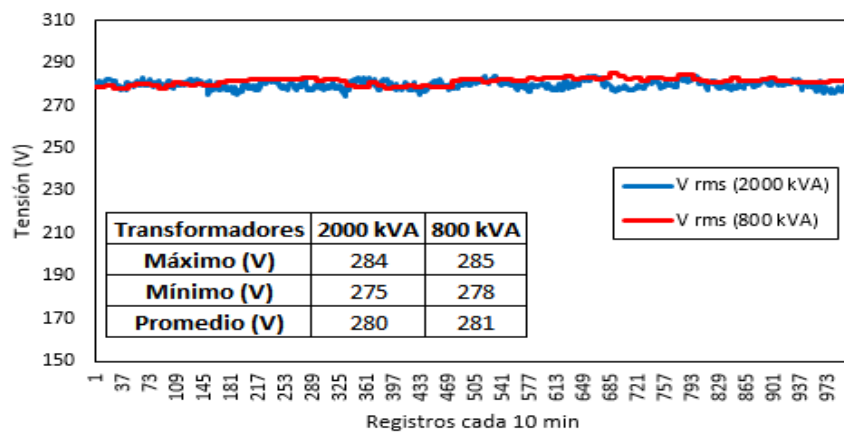


Figura 7.15. Tensiones de línea de los dos transformadores. Elaboración propia

Como se observa en la figura, los dos transformadores tienen un comportamiento similar en las tensiones que alimentan las áreas de formación de las baterías. Debido a que uno de los factores que influye en el indicador de desempeño energético es la tensión de alimentación, se explica en parte el resultado mostrado en el epígrafe anterior, donde se demuestra estadísticamente que no existen diferencias en el desempeño energético de los procesos realizados en los circuitos conectados a los transformadores.

### 7.5.2. Análisis de la influencia de factores asociados al personal de trabajo en el IEE del proceso de formación de baterías.

Para evaluar la influencia del personal encargado en el IEE del proceso de formación se evaluaron tres factores:

1. Turno de trabajo.
2. Hora de inicio de los procesos.
3. Falta de entrenamiento del personal.

#### 7.5.2.1. Turno de trabajo.

En la formación de baterías, en el periodo analizado, han operado cinco equipos de trabajo

## PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA

en jornadas de 12 horas aunque uno de ellos solo operó 6 procesos y será excluido del análisis, se realizó un estudio de comparación de medias para determinar si existen diferencias significativas en el IEE promedio para cada uno de los grupos.

En la tabla 7.9 se muestra el resumen del análisis estadístico con el número de observaciones por turno de trabajo, la media y desviación estándar para cada uno.

Tabla 7.9

*Resumen del análisis de comparación de medias según el turno de trabajo.*

Turno de Trabajo	Recuento	Promedio	Mínimo	Máximo	Rango
1	582	2,34	1,63	2,67	1,04
2	825	2,332	1,87	2,69	0,82
3	820	2,317	1,6	2,48	0,88
4	669	2,323	1,77	2,64	0,87
Total	2896	2,327	1,6	2,69	1,09

*Nota:* Elaboración propia

En la tabla 7.10 se muestran los resultados del ANOVA para la comparación de las medias del IEE por turno de trabajo, el valor de la observancia (P-value) es de 0,0000, al ser mucho menor de 0,05 permite concluir sólidamente que existen diferencias estadísticamente significativas entre las medias del valor del IEE para los diferentes turnos de trabajo con un 95 % de confianza.

Tabla 7.10

*ANOVA de la comparación de medias del IEE por turno de trabajo.*

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	0,2187	3	0,07291	11,99	0,0000
Intra grupos	17,59	2892	0,00608		
Total (Corr.)	17,81	2895			

*Nota:* Elaboración propia

Para identificar los turnos con diferencias significativas se realizó un análisis de

## PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA

Diferencias Mínimas Significativas (LSD). En la tabla 7.11 se muestran los resultados de la prueba de múltiples rangos en la que se concluye que los turnos de trabajo se dividen en dos grupos homogéneos con un desempeño diferente de acuerdo al IEE con una confianza del 95 %.

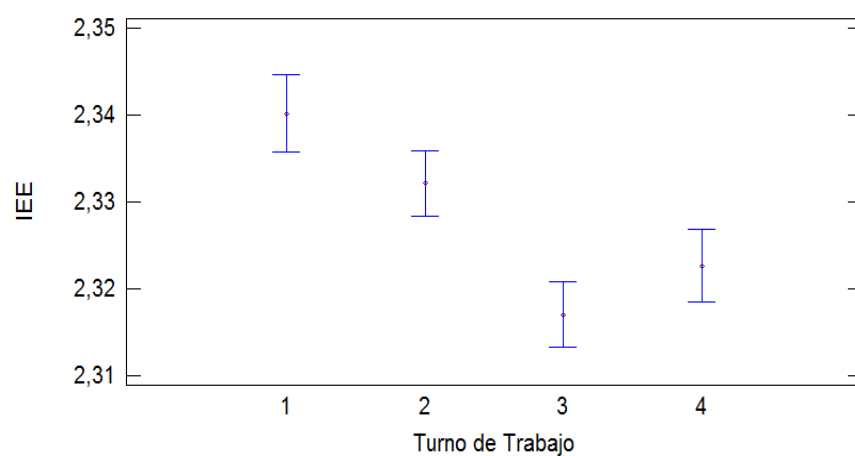
Tabla 7.11

*Resultados de la prueba de comparación de múltiples rangos en los turnos de trabajo. (95 % de confianza)*

Nivel	Casos	Media	Grupos Homogéneos	Conclusiones
3	820	2,317	X	<b>MEJORES TURNOS</b>
4	669	2,323	X	
2	825	2,332	X	<b>PEORES TURNOS</b>
1	582	2,34	X	

*Nota:* Elaboración propia

El análisis se resume en el siguiente gráfico de medias, que permite ratificar la conclusión de que los turnos de trabajo 3 y 4 alcanzan valores del IEE similares y mejores que los 1 y 2 que a su vez son similares entre sí. En análisis se realizó con un 95 % de confianza.



*Figura 7.16.* Comparación de medias del IEE de los turnos de trabajo. Elaboración propia

### ***7.5.2.2. Evaluación de la influencia de la hora de inicio del proceso.***

En la unidad de formación de baterías se trabaja en turnos de 12 horas cambiando a las 7

## PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA

AM y 7 PM, teniendo en cuenta que la hora de inicio del proceso puede influir en el IEE a través del estado del personal se dividieron los procesos de formación en cuatro grupos según la hora de inicio:

- ❖ Grupo 1 – Iniciados entre las 23.00 h y las 05.00 horas
- ❖ Grupo 2 - Iniciados entre las 05.00 h y las 11.00 horas
- ❖ Grupo 3 - Iniciados entre las 11.00 h y las 17.00 horas
- ❖ Grupo 4 - Iniciados entre las 17.00 h y las 23.00 horas

En la tabla 7.12 se muestra el resumen del análisis con el número de observaciones por intervalo y el promedio y desviación estándar de cada uno.

Tabla 7.12

*Resumen del análisis de comparación de medias según el horario de inicio del proceso.*

Hora de Inicio	Recuento	Promedio	Mínimo	Máximo	Rango
1	801	2,335	1,63	2,69	1,06
2	552	2,302	1,71	2,64	0,93
3	781	2,335	1,6	2,67	1,07
4	768	2,333	1,69	2,57	0,88
Total	2902	2,327	1,6	2,69	1,09

*Nota:* Elaboración propia

En la tabla 7.13 se muestran los resultados del análisis de varianza para la comparación de medias del IEE según la hora de inicio del proceso, el valor de la observancia (P-value) es de 0,0000, al ser mucho menor de 0,05 permite concluir sólidamente que existen diferencias estadísticamente significativas entre las medias del valor del IEE según las horas de inicio del proceso de formación con un 95 % de confianza.

Tabla 7.13



## PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA

*ANOVA de la comparación de medias del IEE por turno de trabajo.*

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	0,4474	3	0,1491	24,87	0,0000
Intra grupos	17,38	2898	0,005997		
Total (Corr.)	17,83	2901			

*Nota:* Elaboración propia

Para identificar los horarios de inicio del proceso de formación con diferencias significativas se realizó un análisis LSD, en la tabla 7.14 se muestran los resultados de la prueba de múltiples rangos en la que se puede concluir que los procesos que inician entre las 05.00 y las 11.00 horas tienen un desempeño energético mejor que los demás horarios según el IEE con un 95 % de confianza.

Tabla 7.14

*Resultados de la prueba de comparación de múltiples rangos según el horario de inicio del proceso. (95 % de confianza)*

Hora de Inicio	Casos	Media	Grupos Homogéneos
2	552	2,302	X
4	768	2,33	X
3	781	2,335	X
1	801	2,335	X

*Nota:* Elaboración propia

El gráfico de medias mostrado en la figura 7.17 confirma la conclusión anterior.

## PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA

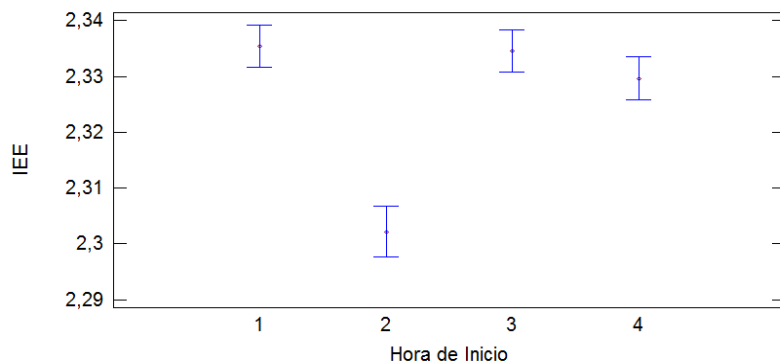


Figura 7.17. Comparación de medias del IEE según la hora de inicio del proceso de formación. (1 de 23.00 a 05.00; 2 de 05.00 a 11.00; 3 de 11.00 a 17.00 y 4 de 17.00 a 23.00). Elaboración propia

Los resultados de este análisis sobre los turnos de trabajo refuerzan la hipótesis de que las operaciones del personal, su preparación, nivel de atención y estandarización de sus operaciones influyen significativamente en la eficiencia energética del proceso de formación de baterías

### 7.5.3. Factores tecnológicos

#### 7.5.3.1. Estado técnico de los circuitos.

El estado técnico de los circuitos es uno de los parámetros que se espera influye en la EE en el proceso de formación de baterías, para evaluarlo se realizó una comparación entre los valores del IEE para cada circuito de la instalación, este análisis se orientó a demostrar si existen diferencias estadísticamente significativas entre la media del IEE para cada circuito, identificar los circuitos con mejores y peores valores del IEE para posteriormente realizar una evaluación técnica comparativa e identificar las causas de las diferencias y proponer las medidas necesarias para reducir las.

En la tabla 7.15 se muestra el resultado del Análisis de Varianza (ANOVA) realizado para la comparación de muestras, el valor de la observancia (P-value) es de 0,0000 al ser mucho menor de 0,05 permite concluir sólidamente que existen diferencias estadísticamente significativas entre las medias del valor del IEE para los diferentes circuitos con un 95 % de confianza.

## PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA

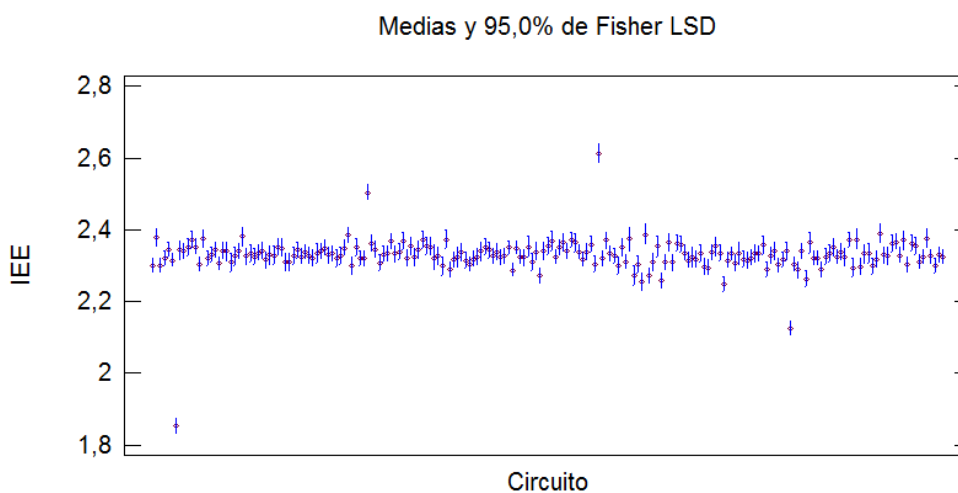
Tabla 7.15

*ANOVA de la comparación de medias del IEE por circuitos de formación.*

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	6,59	35	0,1883	23,62	0,0000
Intra grupos	3,595	451	0,007971		
Total (Corr.)	10,18	486			

*Nota:* Elaboración propia

Para identificar los circuitos cuyo IEE tiene diferencias estadísticamente significativas con los demás se realizó un análisis LSD que se resume en la figura 7.18.



*Figura 7.18.* Gráfico de medias del IEE según el análisis LSD para todos los circuitos. Elaboración propia

Como resultado de esta prueba se pueden identificar los circuitos de mejor y peor desempeño respecto al IEE, estos se relacionan en la tabla 7.16 y 7.17.

Tabla 7.16

*Circuitos de mejor desempeño según el IEE.*

No Circuito	Mediciones	Media	Límite Inferior	Límite Superior
78	15	2,289	2,267	2,312
173	17	2,289	2,268	2,31
94	18	2,288	2,267	2,308
167	17	2,288	2,267	2,309
101	15	2,272	2,25	2,294

## PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA

125	10	2,272	2,245	2,299
129	16	2,272	2,25	2,293
169	16	2,264	2,242	2,285
132	15	2,259	2,236	2,281
127	12	2,254	2,229	2,279
148	18	2,248	2,228	2,269
165	18	2,126	2,105	2,146
7	16	1,852	1,831	1,874

*Nota:* Elaboración propia

Tabla 7.17

*Circuitos de peor desempeño según el IEE.*

No Circuito	Mediciones	Media	Límite Inferior	Límite Superior
116	9	2,612	2,583	2,641
57	15	2,504	2,482	2,526
188	10	2,388	2,361	2,415
128	9	2,387	2,358	2,415
52	15	2,385	2,363	2,408
24	11	2,381	2,355	2,407
2	11	2,378	2,352	2,404
200	12	2,377	2,352	2,402
14	12	2,376	2,351	2,401
124	7	2,374	2,342	2,407
182	8	2,374	2,343	2,404
71	13	2,373	2,349	2,397
77	12	2,373	2,348	2,398
11	13	2,372	2,348	2,395
109	18	2,372	2,352	2,393
180	16	2,372	2,351	2,394
118	14	2,371	2,348	2,394
194	12	2,371	2,346	2,396
66	14	2,369	2,346	2,392
63	15	2,368	2,346	2,39
104	10	2,368	2,341	2,395
192	15	2,367	2,344	2,389
134	12	2,366	2,341	2,391

*Nota:* Elaboración propia

A los circuitos seleccionados se le realizó nuevamente el análisis de comparación de muestras para comprobar si hay diferencias significativas entre ellos. En la tabla 7.18 se puede

## PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA

apreciar el resultado de la prueba de múltiples rangos aplicada para comparar las medias de IEE en los circuitos de peor y mejor desempeño, de la tabla se concluye que hay dos circuitos (**7 y 165**) con un valor medio del IEE mejor y comprobadamente diferentes del resto y otros dos circuitos (**57 y 116**) con un comportamiento peor y probadamente diferente del resto. Además se pueden identificar dos grupos homogéneos, el número 1 integrado por los circuitos 127, 132, 169, 129, 125, 101, 94, 167, 78 y 173 con un IEE mejor y estadísticamente diferente que el número 2 que está integrado por los siguientes circuitos: 148, 134, 192, 104, 63, 66, 118, 194, 11, 109, 180, 77, 182, 124, 14, 175, 178, 179, 200, 205, 208, 209, 2, 24, 52, 128 y 188.

Tabla 7.18

*Resultados de la prueba de comparación de múltiples rangos en los circuitos seleccionados. (95 % de confianza).*

Circuito	Casos	Media	Grupos Homogéneos	Conclusiones	
7	16	1,853	X	MEJORES CIRCUITOS	
165	18	2,126	X		
148	18	2,248	X	GRUPO HOMEGENEO 1 MEJOR DESEMPEÑO	
127	12	2,254	XX		
132	15	2,259	XX		
169	16	2,264	XX		
129	16	2,272	XX		
125	10	2,272	XX		
101	15	2,272	XX		
90	18	2,288	XX		
167	17	2,288	XX		
78	15	2,289	XX		
173	17	2,289	XX		
56	15	2,32	XX		
134	11	2,365	XX		
192	15	2,367	XX		GRUPO HOMEGENEO 1 PEOR DESEMPEÑO
104	10	2,368	XX		
63	15	2,368	XX		
66	14	2,369	XX		
91	14	2,370	XX		
93	14	2,370	XX		
94	13	2,371	XX		

## PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA

118	14	2,371	XX
194	12	2,371	XX
11	13	2,372	XX
109	18	2,372	XX
198	17	2,372	XX
216	17	2,372	XX
180	16	2,372	XX
77	12	2,373	XX
182	8	2,374	XX
157	11	2,374	XX
161	10	2,374	XX
162	12	2,374	XX
124	7	2,374	XX
14	12	2,376	XX
200	12	2,377	XX
2	11	2,378	XX
24	11	2,381	XX
52	15	2,385	XX
175	15	2,385	XX
178	14	2,385	XX
179	12	2,386	XX
205	11	2,386	XX
208	16	2,386	XX
209	14	2,387	XX
128	9	2,387	XX
188	10	2,388	XX
57	15	2,504	X
116	9	2,612	X

Nota: Elaboración propia

PEORES  
CIRCUITOS

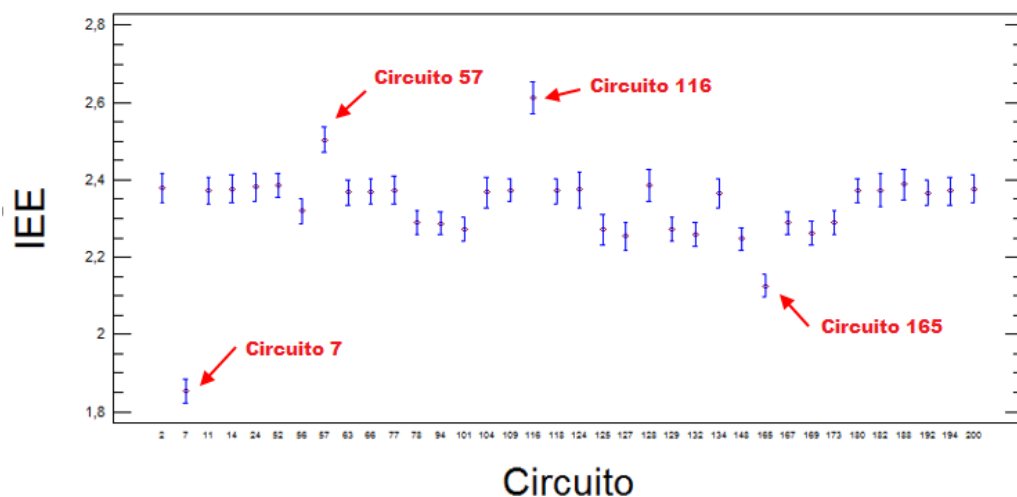


Figura 7.19. Gráfico de medias del IEE según el análisis LSD de los circuitos seleccionados. Elaboración propia

Los circuitos identificados se someten a un análisis técnico comparativo para identificar

## PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA

las causas de las diferencias y proponer acciones que las reduzcan.

**7.5.3.1.1 Revisión energética en el área de formación de baterías.**

En el estudio se revisaron circuitos calificados como de mal comportamiento desde el punto de vista del IEE en el análisis estadístico. En estos circuitos se midieron parámetros eléctricos relacionados con las pérdidas de energía y se identificaron puntos calientes mediante un estudio termográfico.

A continuación se muestran los resultados de las mediciones realizadas en seis circuitos con los datos mostrados en la Tabla 7.19.

Tabla 7.19

*Datos de los circuitos estudiados.*

Circuito	Mesa	Referencia de baterías
175	9	31H – EBG
178	9	31H – EBG
179	9	31H – EBG
205	18	31H - 1100 Poste
208	18	31H - 1100 Poste
209	18	31H - 1100 Poste

*Nota:* Elaboración propia

En cada circuito se midió la caída de tensión y la corriente entre los puntos de conexión y se calcularon las pérdidas según la ecuación (10).

$$P = V \cdot I \quad (10)$$

Donde:

V: diferencia de tensión medida (V).

I: corriente medida (A).

P: potencia (W).

Esta potencia también se calcula como:

## PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA

$$P = I^2 \cdot R \quad (11)$$

Donde:

R: resistencia de los elementos del circuito ( $\Omega$ ).

La ecuación (11), muestra que el comportamiento de las pérdidas es directamente proporcional a la resistencia, pues la demanda de corriente es constante para cada referencia de batería. La resistencia a su vez, depende del estado de los conductores y de los puntos de conexión eléctrica. Mientras peor sean estas condiciones, mayor será la resistencia y viceversa.

En la figura 7.20 se representa el esquema de conexión de los circuitos.

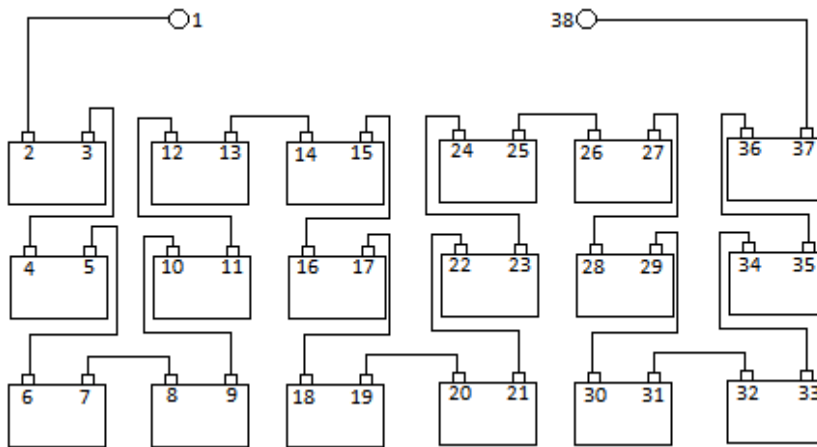


Figura 7.20. Esquema de conexión de los circuitos. Elaboración propia

Los puntos de conexión de la figura son clasificados según los criterios de funcionalidad siguientes:

- ❖ Entradas del circuito: Entre estos dos puntos se alimenta a todo el circuito. La diferencia de tensión registrada en este caso, es igual a la suma de la diferencia de tensión entre todos los puntos de conexión interno del circuito y la potencia calculada constituye la potencia demandada por todo el circuito.
- ❖ Conductores de entrada y salida del circuito: Se refiere a los conductores que unen a la entrada y salida de los circuitos con las baterías ubicadas en los extremos del circuito



## PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA

serie. La diferencia de tensión y la potencia entre los puntos de estos conductores se deben a las pérdidas de cobre o de Joule.

- ❖ Conductores entre baterías: Estos son los puntos entre los conductores que enlazan a las baterías conformando el circuito serie. Como en el caso anterior, la diferencia de tensión y la potencia entre los puntos de estos conductores se deben a las pérdidas de cobre o de Joule.
- ❖ Bornes de baterías: Estos son los bornes positivo y negativo de las baterías, la diferencia de tensión y la potencia entre estos puntos son resultados del proceso de formación de las baterías y no constituyen pérdidas.

En la Tabla 7.20 se muestran las mediciones del circuito 175, en los anexos 1, 2, 3, 4 y 5 se presentan las mediciones del resto de los circuitos.

Tabla 7.20

*Diferencia de tensión, corriente y potencia en el circuito 175.*

Puntos de conexión	Clasificación	Diferencia de tensión (V)	Corriente (A)	Potencia (W)
1-38	Entrada del circuito	304,16	24	7299,89
1-2	Conductor entrada al circuito	1,4	24	33,60
37-38	Conductor salida del circuito	0,062	24	1,49
3-4	Conductor entre baterías	1,014	24	24,34
5-6	Conductor entre baterías	0,552	24	13,25
7-8	Conductor entre baterías	0,875	24	21,00
9-10	Conductor entre baterías	0,06	24	1,44
11-12	Conductor entre baterías	0,282	24	6,77
13-14	Conductor entre baterías	0,432	24	10,37
15-16	Conductor entre baterías	0,64	24	15,36
17-18	Conductor entre baterías	0,32	24	7,68
19-20	Conductor entre baterías	0,167	24	4,01
21-22	Conductor entre baterías	0,136	24	3,26
23-24	Conductor entre baterías	0,052	24	1,25
25-26	Conductor entre baterías	0,117	24	2,81
27-28	Conductor entre baterías	0,228	24	5,47

## PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA

29-30	Conductor entre baterías	0,091	24	2,18
31-32	Conductor entre baterías	0,144	24	3,46
33-34	Conector entre baterías	0,044	24	1,06
35-36	Conductor entre baterías	0,136	24	3,26
2-3	Bornes de baterías	17,43	24	418,32
4-5	Bornes de baterías	16,08	24	385,92
6-7	Bornes de baterías	16,83	24	403,92
8-9	Bornes de baterías	16,15	24	387,60
10-11	Bornes de baterías	16,81	24	403,44
12-13	Bornes de baterías	16,12	24	386,88
14-15	Bornes de baterías	16,02	24	384,48
16-17	Bornes de baterías	16,87	24	404,88
18-19	Bornes de baterías	16,66	24	399,84
20-21	Bornes de baterías	16,60	24	398,40
22-23	Bornes de baterías	16,39	24	393,36
24-25	Bornes de baterías	16,97	24	407,28
26-27	Bornes de baterías	16,40	24	393,60
28-29	Bornes de baterías	16,61	24	398,64
30-31	Bornes de baterías	16,33	24	391,92
32-33	Bornes de baterías	16,89	24	405,36
34-35	Bornes de baterías	16,00	24	384,00
36-37	Bornes de baterías	16,25	24	390,00

*Nota:* Elaboración propia

Se realiza un análisis de pérdidas el cual se centra en la potencia consumida en los conductores, como se explicó, son pérdidas de cobre o de Joule. En estas pérdidas se refleja el mal estado de los conductores, conectores y todos los puntos de contacto eléctrico.

En la tabla 7.21 se representa para cada circuito, la potencia de entrada (Potencia total (W)), la sumatoria de la potencia de los conductores (Pérdidas (W)), y la relación porcentual entre las pérdidas en (W) y la potencia total (Pérdidas (%)).

Tabla 7.21

*Potencia consumida y pérdidas en los circuitos.*

Circuito	Potencia total (W)	Pérdidas (W)	Pérdidas (%)
175	7299,89	162,05	2,22
178	7205,83	111,59	1,55
179	7443,92	92,61	1,24

## PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA

205	5778,11	27,76	0,48
208	5834,98	56,70	0,97
209	5708,07	86,14	1,51

Nota: Elaboración propia

Como se observa, de los seis circuitos, cuatro tienen pérdidas superiores al 1%, llegando al 2,22% en el circuito 175. La diferencia entre los circuitos de mayores y menores pérdidas es de 1,74%.

Teniendo en cuenta que los procesos de formación de las baterías (31H – EBG) y (31H – 1100 Poste) duran aproximadamente 23 horas, en la figura 7.21 se representa las pérdidas de energía aproximadas en cada circuito para un proceso.

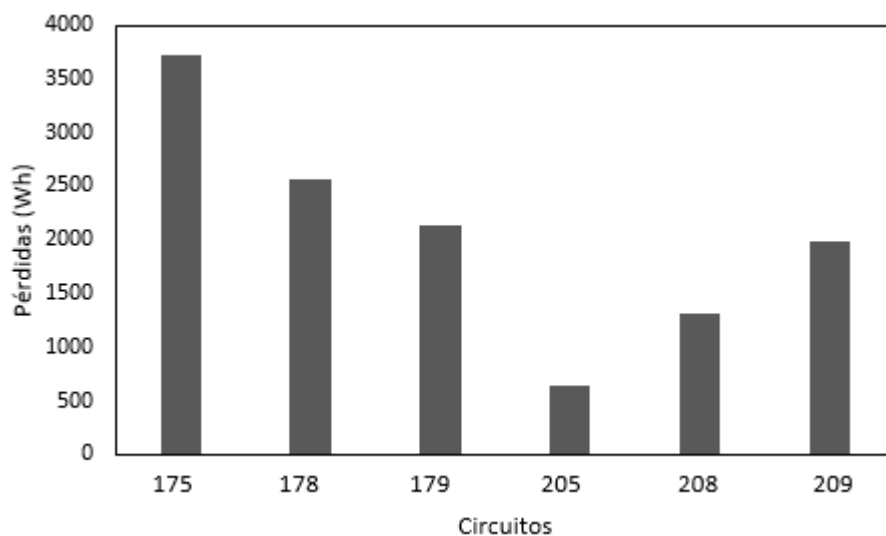


Figura 7.21. Pérdidas por circuito. Elaboración propia

Para profundizar en la incidencia de los conductores en las pérdidas, se obtuvo para cada circuito las pérdidas de cada conductor. En la tabla 7.22 se muestran los resultados del circuito 175, en los anexos 6, 7, 8, 9 y 10 se tabulan los resultados del resto de los circuitos.

Tabla 7.22

*Pérdidas de los conductores circuito 175.*

Puntos de conexión	Clasificación	Pérdidas (W)
--------------------	---------------	--------------

## PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA

1-2	Conductor entrada al circuito	33,60
36-38	Conductor salida del circuito	1,49
3-4	Conductor entre baterías	24,34
5-6	Conductor entre baterías	13,25
7-8	Conductor entre baterías	21,00
9-10	Conductor entre baterías	1,44
11-12	Conductor entre baterías	6,77
13-14	Conductor entre baterías	10,37
15-16	Conductor entre baterías	15,36
17-18	Conductor entre baterías	7,68
19-20	Conductor entre baterías	4,01
21-22	Conductor entre baterías	3,26
23-24	Conductor entre baterías	1,25
25-26	Conductor entre baterías	2,81
27-28	Conductor entre baterías	5,47
29-30	Conductor entre baterías	2,18
31-32	Conductor entre baterías	3,46
33-34	Conductor entre baterías	1,06
35-37	Conductor entre baterías	3,26
Total		162,05

Nota: Elaboración propia

En la figura 7.22 se muestran las pérdidas por conductores de todos los circuitos.

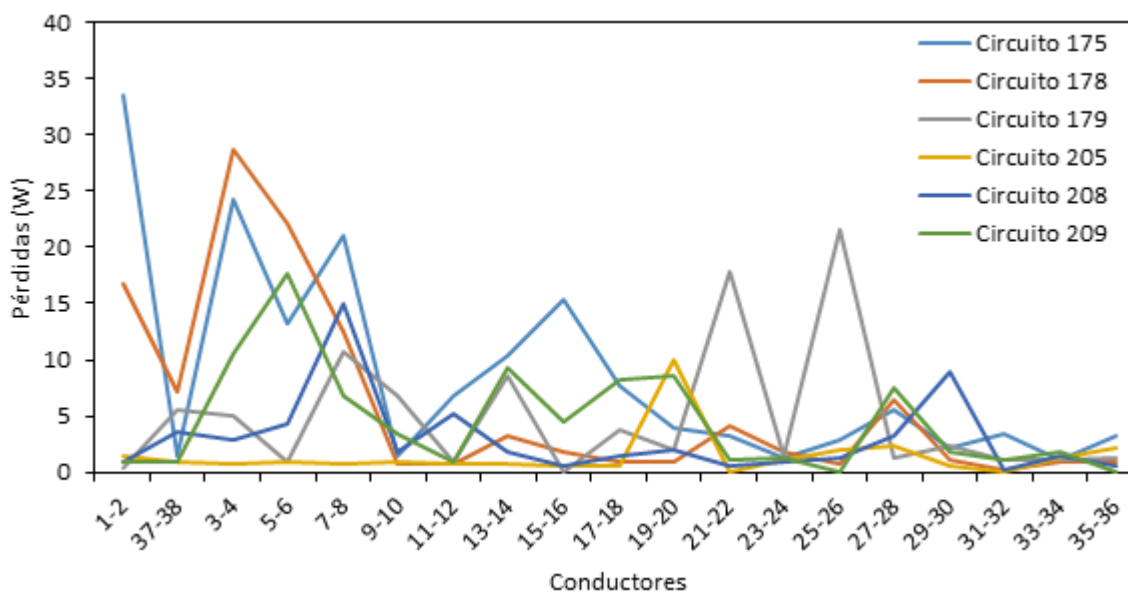


Figura 7.22. Gráfico de pérdidas en los conductores de los circuitos. Elaboración propia

Los conductores del circuito 205 presentan menos pérdidas que la mayoría de los

## PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA

conductores de los otros circuitos, lo cual evidencia diferencias en el estado técnico de conductores, conectores y puntos de contacto eléctrico.

Las altas pérdidas observadas en los conductores (1-2) del circuito 175, (5-6) de los circuitos 175 y 178 y (27-28) del circuito 179, se debe a problemas de conductores deteriorados, puntos de contactos con calcinación y deficiencia en la instalación de los conectores en los bornes, lo que trae consigo un aumento de la resistencia de los elementos que conforman el circuito y por la tanto de las pérdidas. Las pérdidas de potencia de 33,6 W en el conductor (1-2) del circuito 175, representa unas pérdidas de energía de 772,8 Wh, considerando un proceso de formación de 23 h.

En las siguientes imágenes se muestran evidencias de algunos de estos problemas. En la figura 7.23 se muestran conductores muy deteriorados, sobre todo en los extremos. Esto disminuye la superficie de contacto, produce sobrecalentamiento y aumenta la resistencia y las pérdidas.

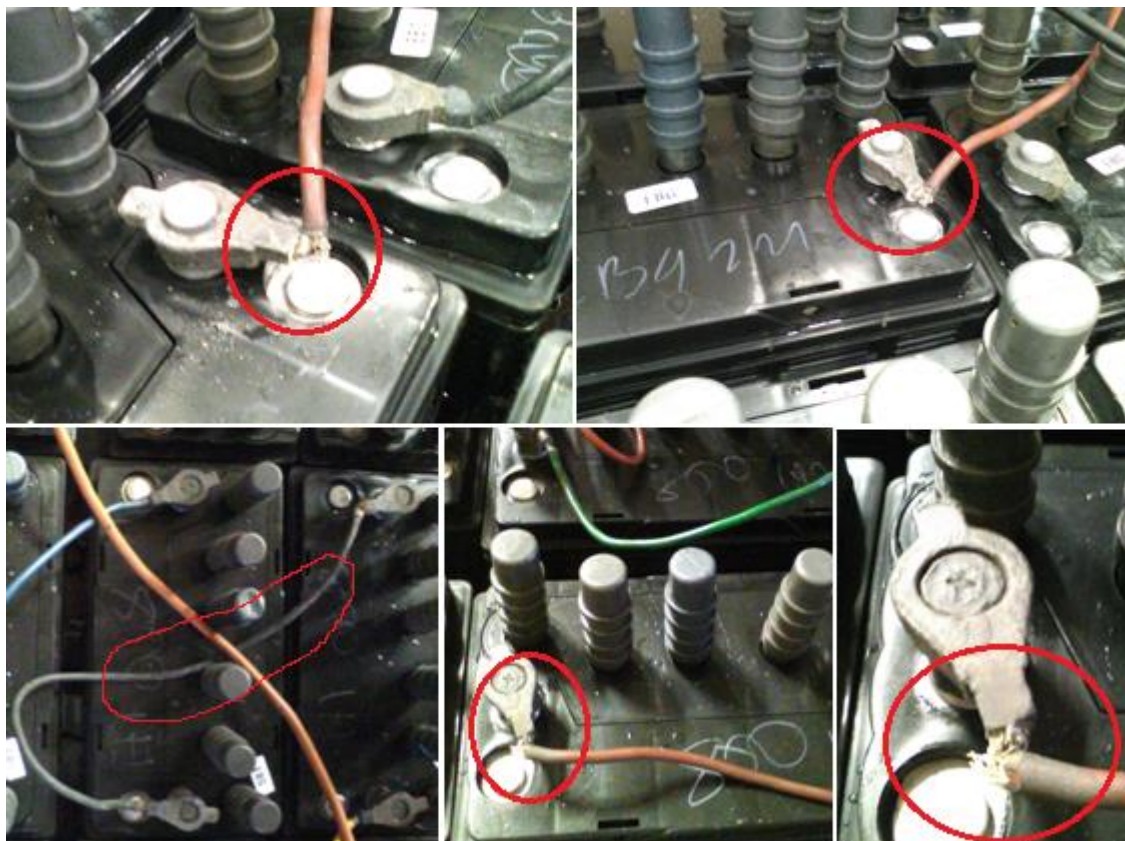


Figura 7.23. Conductores deteriorados. Elaboración propia

En la figura 7.24 se muestran conectores que no son bien introducidos en los bornes lo que disminuye la superficie de contacto.

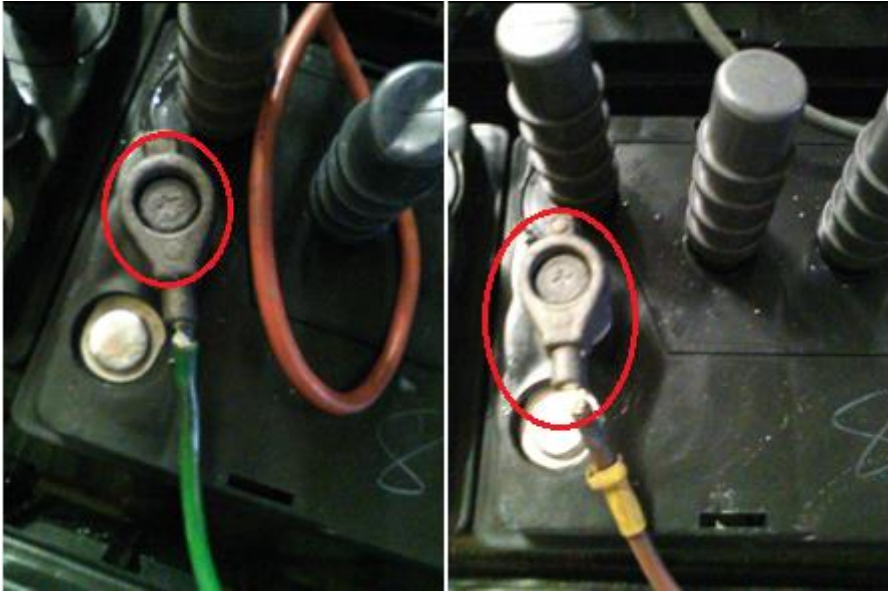


Figura 7.24. Instalación deficiente de los conectores en los bornes. Elaboración propia

En la figura 7.25 se muestran conectores con un alto nivel de corrosión y deterioro que aumenta el calentamiento, la resistencia y las pérdidas.

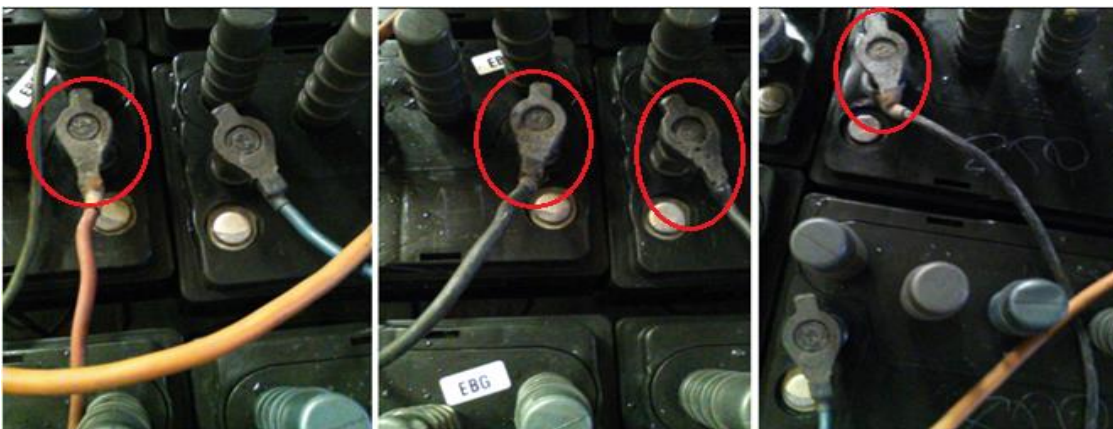


Figura 7.25. Conectores deteriorados. Elaboración propia

El efecto de los problemas señalados fueron verificados también mediante un estudio termográfico. A continuación se muestran los resultados en circuitos donde se hizo más evidente la presencia de puntos calientes.

En la figura 7.26 se presentan las imágenes termográficas en los circuitos 91, 93 y 94. Estos circuitos se ubican en la mesa 10\_2 y en el momento del estudio se encontraban

## PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA

conformando la misma referencia de batería (24A-24AS800). Como puede observarse, en el circuito 91 el fusible alcanzó una temperatura de 61,4 °C superior en 24 °C a los circuitos 93 y 94 en los cuales la temperatura alcanzó valores de 37 °C y 38 °C respectivamente.




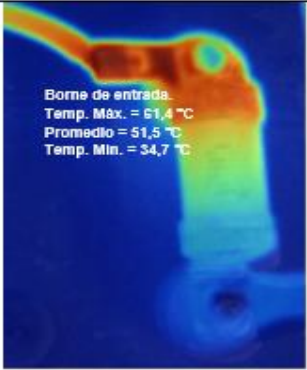
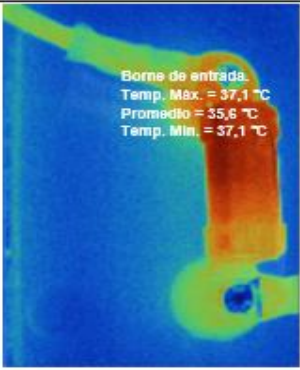
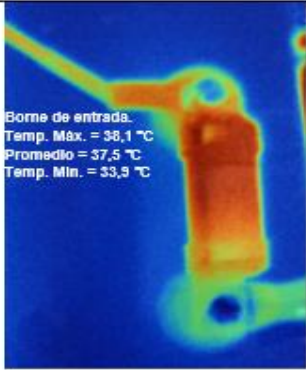
Circuito 91, mesa 10_2 Batería 24A-24AS800	Circuito 93, mesa 10_2 Batería 24A-24AS800	Circuito 94, mesa 10_2 Batería 24A-24AS800
Bornes de entrada y fusible	Bornes de entrada y fusible	Bornes de entrada y fusible
		
		

Figura 7.26. Análisis termográfico en los circuitos 91, 93 y 94. Elaboración propia

A continuación se muestran las mediciones en los bornes de entrada de los circuitos 157, 161 y 162. Se puede observar que en el circuito 162 se alcanzan temperaturas de 55,6 °C, muy superiores a los 37 °C que se alcanzan en los otros dos circuitos.



## PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA




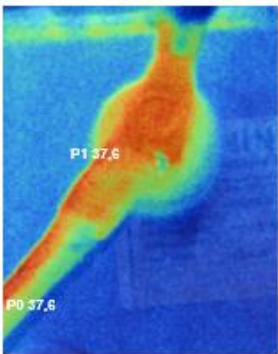
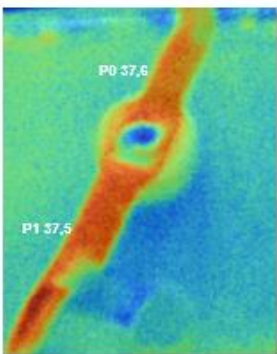
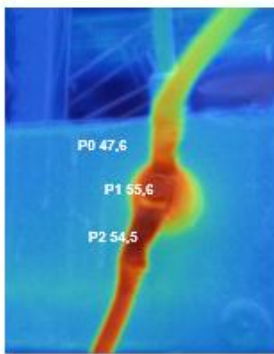
Circuito 157 mesa 15_1 Batería 24B 650-DFS	Circuito 161 mesa 15_1 Batería 24B 650-DFS	Circuito 162 mesa 15_1 Batería 24B 650-DFS
Bornes de entrada sin fusible	Bornes de entrada sin fusible	Bornes de entrada sin fusible
		
		

Figura 7.27. Análisis termográfico en los bornes de entrada en los circuitos 157, 161 y 162. Elaboración propia

En las figuras siguientes se muestran los resultados del análisis termográfico en las mesas de formación de baterías, lo que permitió identificar puntos calientes en los conductores que conectan a las baterías y en los puntos de unión de los contactos eléctricos.

En la figura 7.28 se presentan los circuitos 91, 93 y 94 de la mesa 10\_2, que se encontraban conformando baterías de referencia 24A-24AS800, en la figura 7.29 se muestran los circuitos 157, 161 y 162 ubicados en las mesas 15\_1, que estaban conformando baterías de referencia 24B 650-DFS y en la figura 7.30 se muestran los circuitos 198 y 216 de la mesa 17\_1, que se encontraban conformando baterías de referencia NS 60510DFS.

## PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA

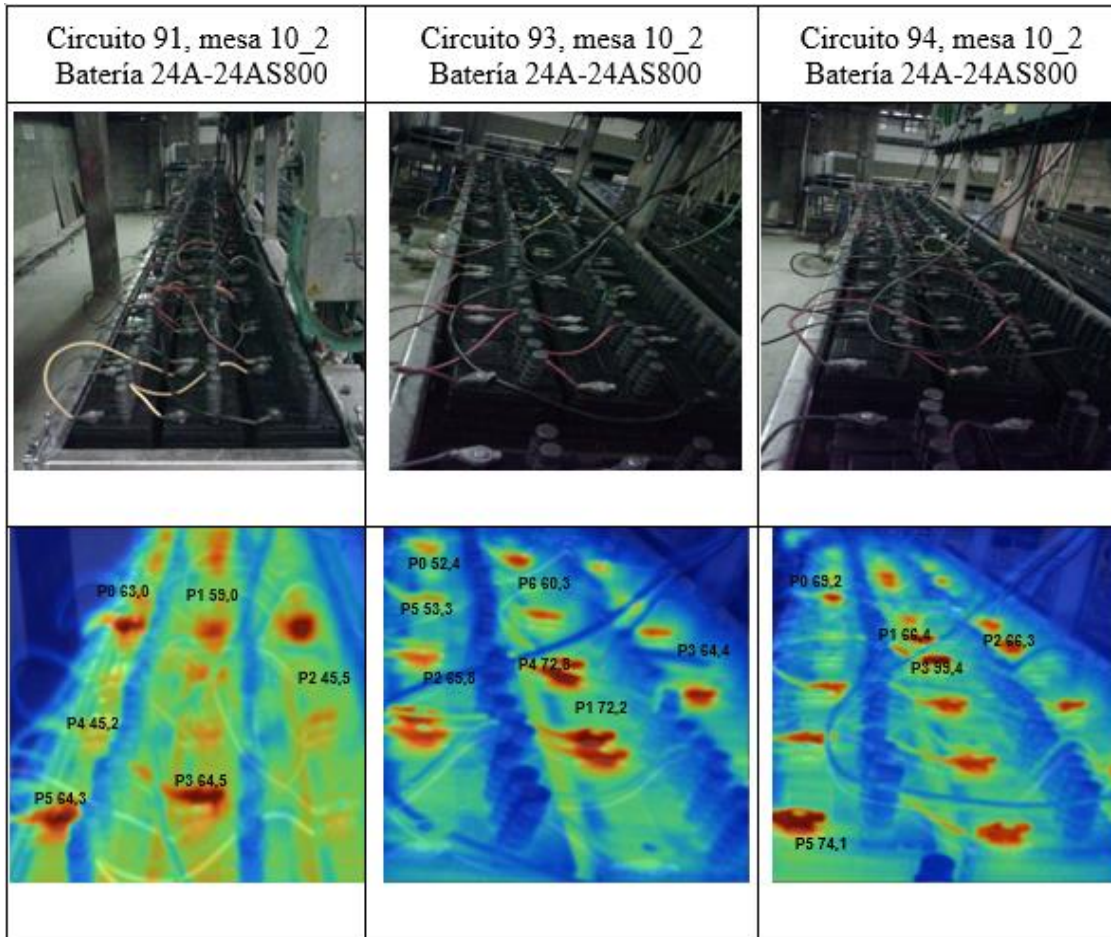


Figura 7.28. Análisis termográfico en las mesas de los circuitos 91, 93 y 94. Elaboración propia

## PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA

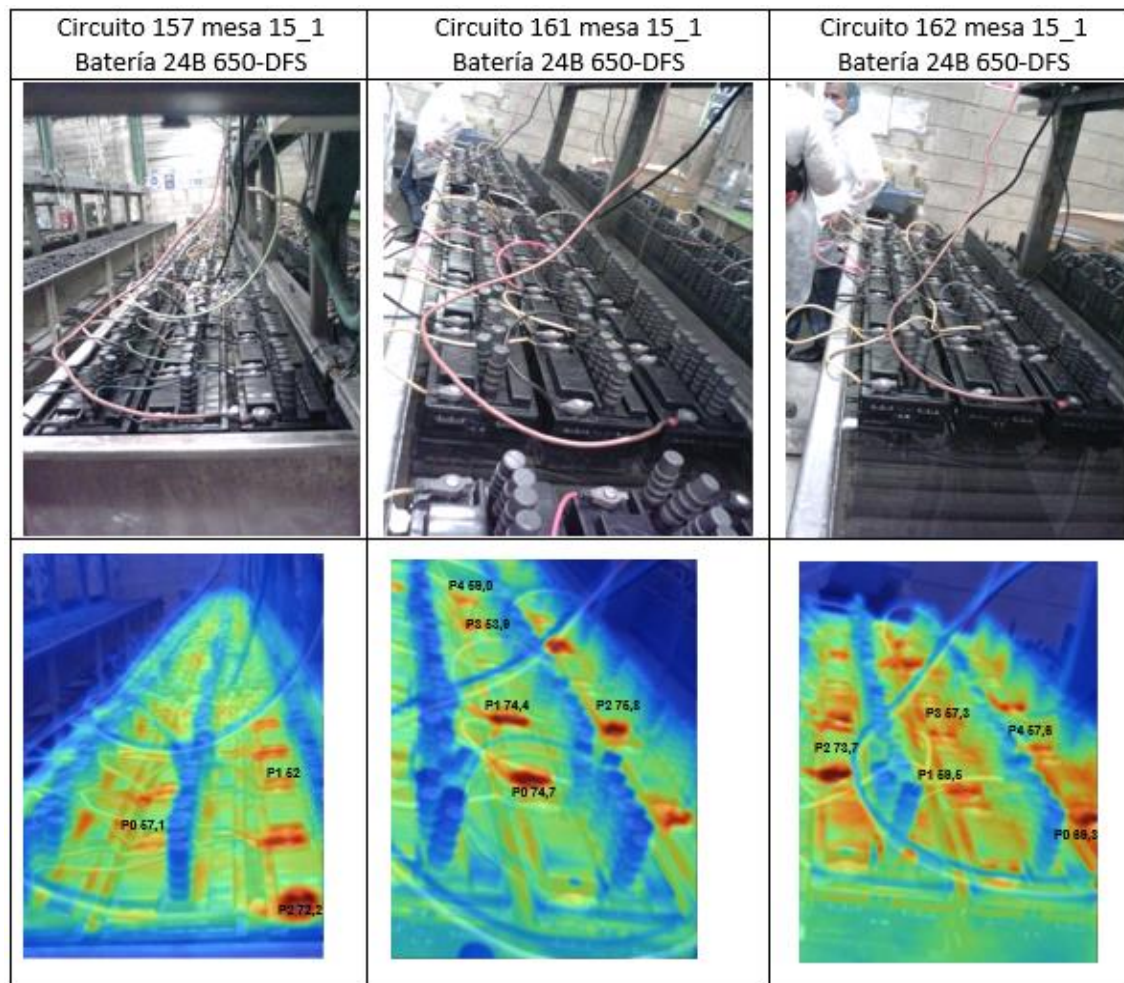


Figura 7.29. Análisis termográfico en las mesas de los circuitos 157, 161 y 162. Elaboración propia

## PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA

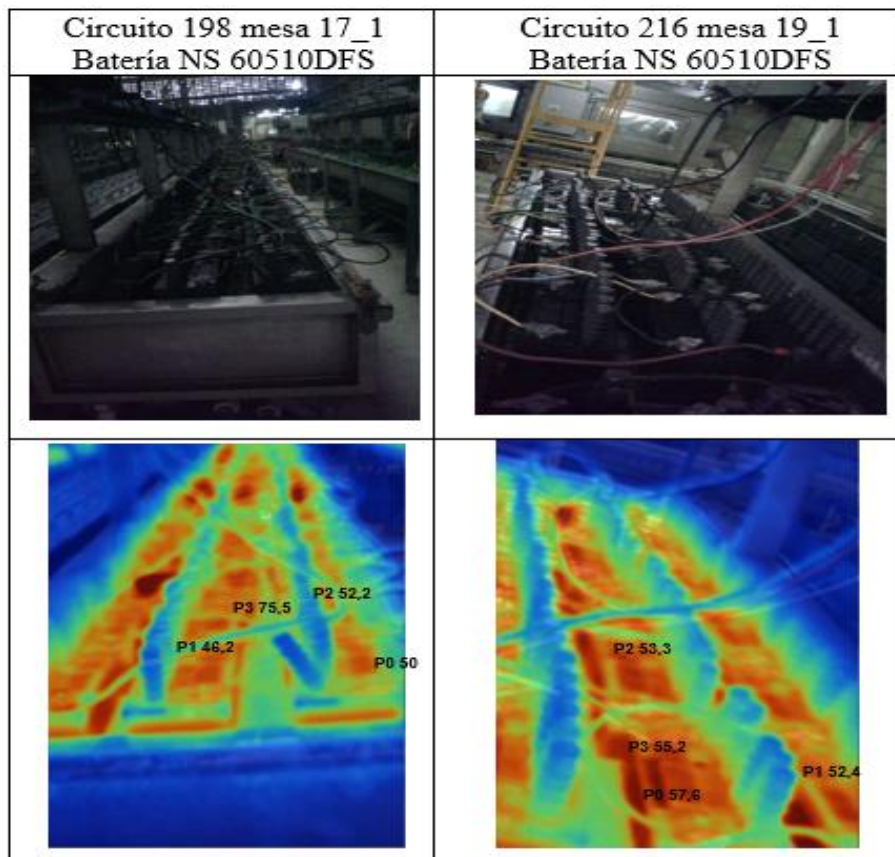


Figura 7.30. Análisis termográfico en las mesas de los circuitos 198 y 216. Elaboración propia

En todos los casos se identificaron diferencias apreciables entre las temperaturas, lo cual se resume en la tabla siguiente.

Tabla 7.23

*Registros de temperatura en las mesas de los circuitos analizados.*

Referencia	Circuito	Temperatura mínima °C	Temperatura máxima °C	$\Delta T$ °C
24A-24AS800	91	45,5	64,5	19
	93	52,4	72,6	20,2
	94	66,3	99,4	33,1
	157	52	72,2	20,2
Batería 24B 650-DFS	161	53,9	75,8	21,9
	162	57,3	73,7	16,4
NS 60510DFS	198	50	75,5	25,5
	216	52,4	57,6	5,2

Nota: Elaboración propia

## PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA

### ***7.5.3.2. Temperatura del proceso.***

Otro aspecto tecnológico evaluado fue la temperatura del electrolito durante los procesos de formación, que se controla en el rango de 54 a 64 °C a través del sistema de enfriamiento de las mesas de carga. La evaluación se realizó a través de un análisis de correlación entre la temperatura media registrada en cada proceso y el IEE, el resultado no evidenció correlación entre ambos parámetros por lo que se descarta que la temperatura del electrolito dentro del rango establecido tenga influencia significativa en la EE del proceso de formación.

### ***7.5.3.2. Nivel de tensión en el sistema de suministro.***

El nivel de tensión en el sistema de suministro de las mesas de formación es uno de los factores tecnológicos a tener en cuenta en la eficiencia energética del proceso.

El consumo de energía por circuito en el proceso de formación de baterías se determina como:

$$E = V_{DC} \cdot Ah \quad (12)$$

Donde:

E: consumo de energía (W).

VDC: tensión a la salida de cada convertidor (V).

Ah: capacidad de carga de cada batería.

La capacidad de carga de cada batería depende de la referencia de esta, por lo tanto, la variable que permite un ahorro de energía es la tensión.

En el libro “Lead-Acid Batteries: Science and Technology”, de Detchko Pavlov (2011), se detallan los fenómenos eléctricos y químicos que se producen en la formación de baterías de plomo ácido. En el epígrafe 12.1.2.2, página 503, se explican los parámetros técnicos que deben cumplirse durante el proceso de formación. El inciso c), se refiere específicamente a los

## PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA

requerimientos en los niveles de tensión, en este sentido plantea que:

“La tensión en la batería debe de ser inferior a aquella que causan una evolución intensiva de oxígeno e hidrógeno, ya que la producción de gases podría incrementar las pérdidas de energía y las emisiones dañinas al medio ambiente. El límite de tensión para la formación depende de la temperatura, el tipo de aleación usada en la rejilla, la concentración de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, y la composición de fase de la pasta, pero generalmente es aceptado que tensión del proceso de formación de baterías debe ser menor que 2,60-2.65 V por celda.” En baterías de 6 celdas implica un límite entre 15,6 y 15.9 V.

En otras partes del mismo texto y en otras fuentes bibliográficas consultadas, se refiere a este límite de 16 V en el proceso para reducir las emisiones gaseosas (Kiessling, 1992; D. Pavlov, 2011; Prout, 1993).

En los procesos analizados, se obtuvo una tensión promedio por circuito de 312 V, lo que equivale a 17.3 V por baterías, valor muy superior a lo establecido por la literatura especializada. En la figura siguiente se muestran los gráficos de las tensiones registradas por circuito y la tensión sugerida. En el análisis se aplicó el método de Hampel (Lin, Recke, Knudsen, & Jørgensen, 2007) para filtrar los datos fuera de control.

Según la literatura especializada, la tensión recomendada (Kiessling, 1992; D. Pavlov, 2011; Prout, 1993) por circuito es:

$$V_{\text{REC(circ)}} = N_b \cdot V_{\text{REC(bat)}} \quad (13)$$

$$V_{\text{REC(circ)}} = 18 \cdot 16 = 288\text{V} \quad (14)$$

Donde:

$V_{\text{REC(circ)}}$ : tensión por circuito recomendada por la literatura especializada (V).

$V_{\text{REC(bat)}}$ : tensión por baterías recomendada por la literatura especializada (V).

PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA

N<sub>b</sub>: número de baterías

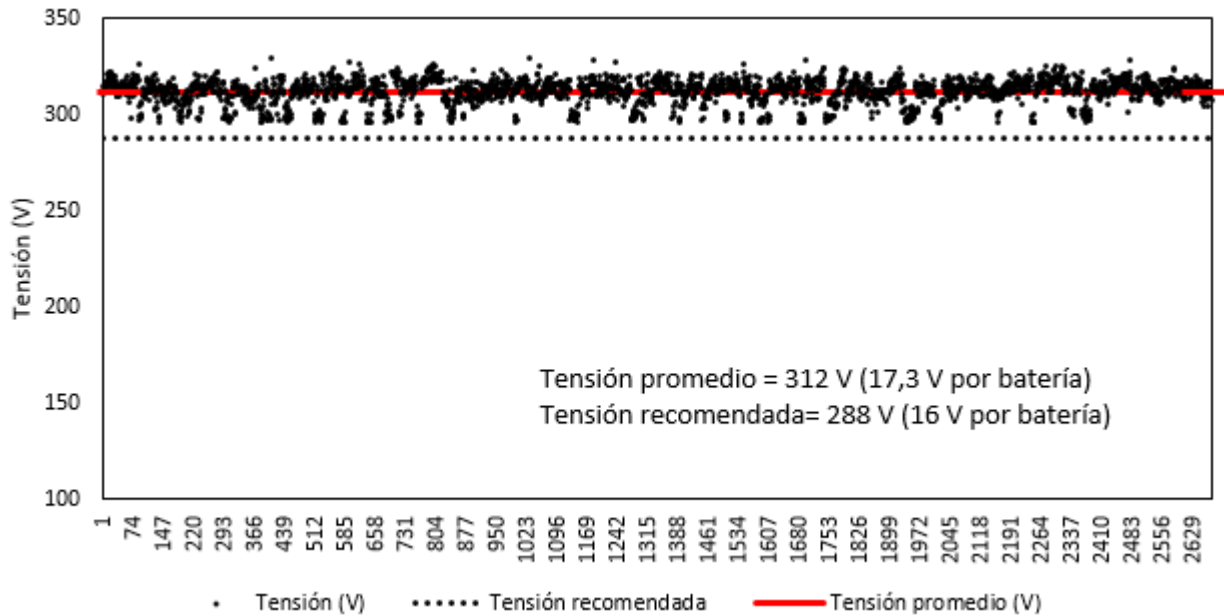


Figura 7.31. Tensiones registradas por circuito y recomendada por la literatura. Elaboración propia

Este comportamiento también fue verificado en las mediciones directas realizadas en las mesas. En la figura 7.32 se muestra la tensión medida por baterías y la tensión recomendada por la literatura especializada. Como en el caso anterior se aplicó el método de Hampel (Lin et al., 2007) para filtrar los datos fuera de control debido fundamentalmente a las caídas de tensión detectado en los conductores.

## PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA

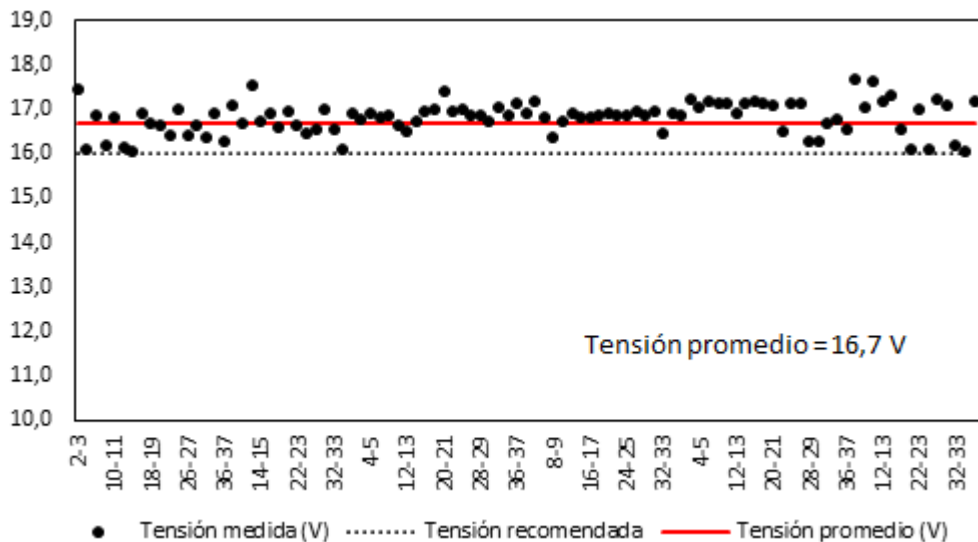


Figura 7.32. Tensiones medidas en las baterías y recomendada por la literatura. Elaboración propia

Los resultados confirman nuevamente que los niveles de tensión en las baterías son superiores a los valores recomendados, y en los casos en que son inferiores, es debido a las caídas de tensión en los conductores.

### 7.6. Oportunidades de ahorro en la UFB

Teniendo en cuenta los factores antes identificados, se propone un plan de acción para evitar los problemas detectados como; mal estado de los conductores y conectores, punto de contactos calientes, instalaciones deficientes de los conectores en los bornes, elevado nivel de tensión en el sistema de suministro y así obtener un ahorro de energía eléctrica en la UFB, los cuales se mencionan a continuación:

- ❖ Establecer requisitos de uso para los conductores intermedios. Inspección frecuente de su estado técnico y medición de su resistencia.
- ❖ Implementar la limpieza de los conectores y los puntos de contacto
- ❖ Implementar la inspección termografía sistemática para evaluar la calidad del proceso desde el punto de vista energético.



## PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA

- ❖ Protocolizar las operaciones manuales para la conexión de los circuitos.
- ❖ Implementar un sistema de mantenimiento frecuente en el área, que asegure la limpieza y el buen estado de los contactos fijos.
- ❖ Rediseño de los conectores.
- ❖ Fijar el suministro de tensión en la sección de formación de baterías en 16,4 Volt de acuerdo a las posibilidades del transformador

### **7.7. Implementación y evaluación**

Las acciones propuestas para el ahorro de energía eléctrica comenzaron aplicarse a finales del 2015, alcanzándose una mejora significativa del desempeño energético.

Desde enero hasta julio de 2016, la gerencia realizó el análisis mensual del desempeño energético en la empresa, evaluó los resultados de las medidas implementadas y tomó las acciones necesarias en caso de desviaciones. En la figura 7.33 se muestran los resultados de los seis meses evaluados. A pesar del significativo incremento de la producción de baterías y el correspondiente aumento del consumo de energía, el indicador de desempeño energético estuvo por debajo de la LBe y sobre la línea meta establecida inicialmente.

## PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA

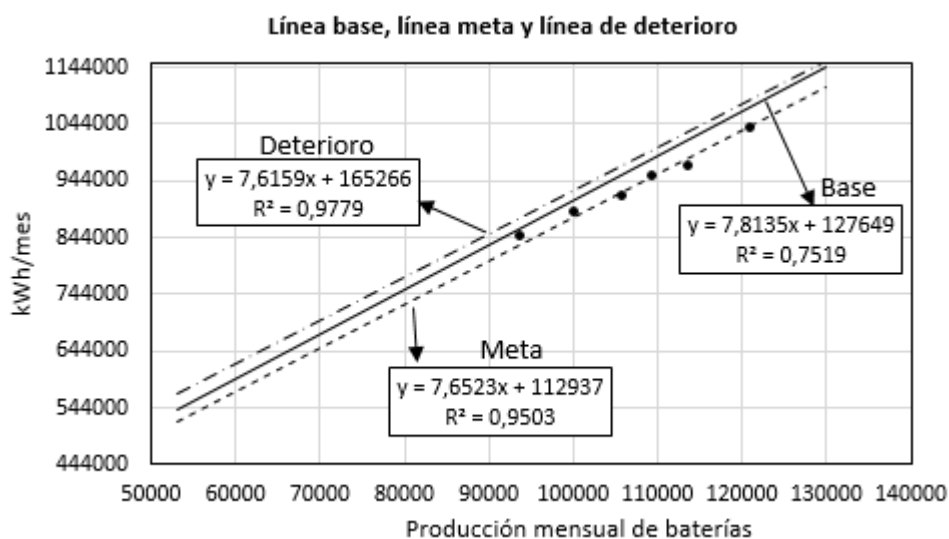


Figura 7.33. Resultados del análisis mensual del desempeño energético en la empresa. Elaboración propia

En la tabla 7.24 se muestra el ahorro de energía mensual calculado como la diferencia entre el pronóstico del consumo de energía por la LBe y el consumo de energía real. En todo el período se alcanzó un ahorro de energía de 201 934 kWh (3,48 %), el mayor ahorro de energía mensual fue de 47 548 kWh (4,68%) y el menor ahorro de energía mensual fue de 16 270 kWh (1,89%).

Tabla 7.24

*Ahorro de energía total y mensual.*

Mes	Producción (Baterías)	Consumo de energía pronosticado por LBe (kWh)	Consumo real de energía (kWh)	Ahorro de energía (kWh)	Ahorro de energía (%)
Enero	93840	860868	844597	16270	1,89
Febrero	100242	910890	887207	23683	2,60
Marzo	109503	983251	949624	33627	3,42
Abril	121108	1073926	1034406	39520	3,68
Mayo	105971	955653	914369	41284	4,32
Junio	113693	1015989	968441	47548	4,68

## PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA

---

Total	644357	5800577	5598644	201934	3,48
-------	--------	---------	---------	--------	------

---

*Nota:* Elaboración propia

## 8. Conclusiones

La implementación de la ISO 50001, específicamente su etapa de planificación energética, permitió obtener un indicador de desempeño energético para evaluar la eficiencia energética en el proceso de formación de baterías.

A partir de un análisis estadístico se identificaron los factores que afectaban el consumo de la energía eléctrica en la unidad de formación de batería dentro de los cuales se encuentra el mal estado de los conductores y conectores, punto de contactos calientes, instalaciones deficientes de los conectores en los bornes y elevado nivel de tensión en el sistema de suministro.

Se obtiene un indicador de eficiencia energética que relaciona el consumo de energía y las baterías equivalentes producidas en el área de formación de baterías, el cual permite evaluar la eficiencia del proceso.

Se implementaron acciones para la mejora del desempeño energético en la unidad de formación de batería que permitieron la reducción del consumo semestral de energía eléctrica en un valor de 201 934kWh equivalente a 81.783.675 COP.

## 9. Bibliografía

- Abdelaziz, E. A., Saidur, R., & Mekhilef, S. (2011). A review on energy saving strategies in industrial sector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(1), 150–168.  
doi:10.1016/j.rser.2010.09.003
- Alan P. Rossiter. (2015). *Energy management and efficiency for the process industries*.
- ALAVA INGENIEROS. (2011). Guía de termografía para mantenimiento predictivo. Retrieved from <http://www.alava-ing.es/repositorio/6769/pdf/3505/2/guia-de-termografia-para-mantenimiento-predictivo.pdf>
- Avella Campos, J. C., Caicedo Prías, O. F., Oqueña Quispe, E. C., Medina Vidal, J. R., & Figueroa Lora, E. D. (2008). Modelo de gestión energética para el sector productivo nacional. *Prospectiva*, 6(30), 18–31. Retrieved from [https://www.uac.edu.co/images/stories/publicaciones/revistas\\_cientificas/prospectiva/volum-en-6-no-1/](https://www.uac.edu.co/images/stories/publicaciones/revistas_cientificas/prospectiva/volum-en-6-no-1/)
- Azenha, M., Faria, R., & Figueiras, H. (2011). Thermography as a technique for monitoring early age temperatures of hardening concrete. *Construction and Building Materials*, 25(11), 4232–4240. doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.04.065
- Bunse, K., Vodicka, M., Schönsleben, P., Brühlhart, M., & Ernst, F. O. (2011). Integrating energy efficiency performance in production management - Gap analysis between industrial needs and scientific literature. *Journal of Cleaner Production*, 19(6-7), 667–679.  
doi:10.1016/j.jclepro.2010.11.011
- Cabello Eras, J. J., Sagastume Gutiérrez, A., García Lorenzo, D., Cogollos Martínez, J. B., Hens, L., & Vandecasteele, C. (2015). Bridging universities and industry through cleaner

## PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA

production activities. Experiences from the Cleaner Production Center at the University of Cienfuegos, Cuba. *Journal of Cleaner Production*, 108(2015), 1–10.

doi:10.1016/j.jclepro.2014.11.063

Cabello, J., Sousa Santos, V., Sagastume Gutiérrez, A., Guerra Plasencia, M. Á., Haeseldonckx, D., & Vandecasteele, C. (2016). Tools to improve forecasting and control of the electricity consumption in hotels. *Journal of Cleaner Production*, 137, 803–812.

doi:10.1016/j.jclepro.2016.07.192

Cagno, E., & Trianni, A. (2014). Evaluating the barriers to specific industrial energy efficiency measures: An exploratory study in small and medium-sized enterprises. *Journal of Cleaner Production*, 82, 70–83. doi:10.1016/j.jclepro.2014.06.057

Cataliotti, A., Genduso, F., Raciti, A., Member, S., & Galluzzo, G. R. (2007). Generalized PWM – VSI Control Algorithm Based on a Universal Duty-Cycle Expression : Theoretical Analysis , Simulation Results , and Experimental Validations, 54(3), 1569–1580.

Chan, Y., & Kantamaneni, R. (2015). *Study on Energy Efficiency and Energy Saving Potential in Industry and on Possible Policy Mechanisms*. London: ICF Consulting.

Chih-Chiang Hua, & Meng-Yu Lin. (2000). A study of charging control of lead-acid battery for electric vehicles. *ISIE'2000. Proceedings of the 2000 IEEE International Symposium on Industrial Electronics (Cat. No.00TH8543)*, 1, 135–140. doi:10.1109/ISIE.2000.930500

Christoffersen, L. B., Larsen, A., & Togeby, M. (2006). Empirical analysis of energy management in Danish industry. *Journal of Cleaner Production*, 14(5), 516–526.

doi:10.1016/j.jclepro.2005.03.017

Climaco-Pinto, R., Barros, A. S., Locquet, N., Schmidtke, L., & Rutledge, D. N. (2009).

Improving the detection of significant factors using ANOVA-PCA by selective reduction of

## PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA

residual variability. *Analytica Chimica Acta*, 653(2), 131–142.

doi:10.1016/j.aca.2009.09.016

Coleman, M., Hurley, W. G., & Lee, C. K. (2008). An Improved Battery Characterization Method Using a Two-Pulse Load Test, 23(2), 708–713. doi:10.1109/TEC.2007.914329

Dranezt. (n.d.). User ' s Guide, (September 2006).

Duarte Forero, J., Guillín Estrada, W., & Sánchez Guerrero, J. (2018). Desarrollo de una metodología para la predicción del volumen real en la cámara de combustión de motores diésel utilizando elementos finitos. *INGE CUC*, 14(1), 122-132.

<https://doi.org/10.17981/ingecuc.14.1.2018.11>

EnerSys. (2006). APPLICATION Genesis™ NP and NPX Series Genesis NP & NPX Series Application Manual.

European Commission (EC). (2014). *Communication from the commission to the European parliament and the council energy efficiency and its contribution to energy security and the 2030 Framework for climate and energy policy*. Brussels.

Fawkes, S., Oung, K., & Thorpe, D. (2016). *Best Practices and Case Studies for Industrial Energy Efficiency Improvement – An introduction for policy makers* (Copenhagen). Copenhagen.

Fluke. (2014). Nuevos productos de Fluke.

García Samper, M. A., Guiliany, J. G., & Eras, J. C. (2017). Eficiencia En El Uso De Los Recursos Y Producción Más Limpia (Recp) Para La Competitividad Del Sector Hotelero. *Revista de Gestão Social E Ambiental*, 11(2), 18. doi:10.24857/rgsa.v11i2.1252

García-León, R., Echavez Díaz, R., & Flórez Solano, E. (2018). Análisis termodinámico de un disco de freno automotriz con pilares de ventilación tipo NACA 66-209. *INGE CUC*, 14(2),

## PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA

9-18. <https://doi.org/10.17981/ingecuc.14.2.2018.01>

Giacone, E., & Mancò, S. (2012). Energy efficiency measurement in industrial processes.

*Energy*, 38(1), 331–345. doi:10.1016/j.energy.2011.11.054

Gielen, D., & Taylor, P. (2009). Indicators for industrial energy efficiency in India. *Energy*,

34(8), 962–969. doi:10.1016/j.energy.2008.11.008

Glowacz, A., & Glowacz, Z. (2017). Diagnosis of the three-phase induction motor using thermal

imaging. *Infrared Physics and Technology*, 81, 7–16. doi:10.1016/j.infrared.2016.12.003

Hens, L., Block, C., Cabello-Eras, J. J., Sagastume-Gutierrez, A., Garcia-Lorenzo, D., Chamorro,

C., ... Vandecasteele, C. (2018). On the evolution of “Cleaner Production” as a concept and a practice. *Journal of Cleaner Production*, 172, 3323–3333.

doi:10.1016/j.jclepro.2017.11.082

Hens, L., Cabello-Eras, J. J., Sagastume-Gutiérrez, A., Garcia-Lorenzo, D., Cogollos-Martinez,

J. B., & Vandecasteele, C. (2017). University-industry interaction on cleaner production.

The case of the Cleaner Production Center at the University of Cienfuegos in Cuba, a country in transition. *Journal of Cleaner Production*, 142, 63–68.

doi:10.1016/j.jclepro.2015.10.105

Hou, S. J., Onishi, Y., Minami, S., Ikeda, H., Sugawara, M., & Kozawa, A. (2005). Charging and

Discharging Method of Lead Acid Batteries Based on Internal Voltage Control. *Journal of Asian Electric Vehicles*, 3(1), 733–737. doi:10.4130/jaev.3.733

ISO. (2011). Traducción oficial Official translation Traduction officielle ISO. *Order A Journal*

*On The Theory Of Ordered Sets And Its Applications*, 2009, 58.

ISO. (2014). ISO 50004: Energy management systems - Guidance for the implementation.

maintenance and improvement of an energy management system, 2014(50), 1–45.



## PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA

- Jossen, A., Garche, J., & Sauer, D. U. (2004). Operation conditions of batteries in PV applications. *Solar Energy*, 76(6), 759–769. doi:10.1016/j.solener.2003.12.013
- Jung, J., Zhang, L., & Zhang, J. (2015). *Lead-Acid Battery Technologies: Fundamentals, Materials, and Applications*. doi:https://doi.org/10.1201/b18665-7
- Jung, J., Zhang, L., & Zhang, J. (2016). *Lead-acid Battery Technologies. Fundamentals, Materials and Applications* (CRC Press). Florida.
- Kaygusuz, K. (2012). Energy for sustainable development: A case of developing countries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(2), 1116–1126. doi:10.1016/j.rser.2011.11.013
- Kiessling, R. (1992). *Lead Acid Battery Formation Techniques*. Shelton.
- Laborda, A., Robinson, A., Wang, S., Zhang, Y., & Reed, P. (2018). Fatigue assessment of multilayer coatings using lock-in thermography. *Materials and Design*, 141, 361–373. doi:10.1016/j.matdes.2018.01.004
- Lin, B., Recke, B., Knudsen, J. K. H., & Jørgensen, S. B. (2007). A systematic approach for soft sensor development. *Computers and Chemical Engineering*, 31(5-6), 419–425. doi:10.1016/j.compchemeng.2006.05.030
- Luo, X., Lu, Z., & Xu, X. (2014). Non-parametric kernel estimation for the ANOVA decomposition and sensitivity analysis. *Reliability Engineering and System Safety*, 130, 140–148. doi:10.1016/j.ress.2014.06.002
- M. Nuñez, J. Correa, G. Herrera, P. Gómez, S. Morón & N. Fonseca “Study of Perceptions on Clean and SelfSustainable Energy”, *IJMSOR*, vol. 3, no. 1, pp. 11-15, 2018. https://doi.org/10.17981/ijmsor.03.01.02
- Matson, N. E., & Piette, M. A. (2005). *High Performance Commercial Building Systems: Review*

## PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA

*of California and National Benchmarking Methods. Working Draft. Berkeley.*

Miloloza, I. (2013). Tendencies of Development of Global Battery Market with Emphasis on Republic of Croatia. *Interdisciplinary Description of Complex Systems*, 11(3), 318–333.

doi:10.7906/indecs.11.3.3

Minipa. (n.d.). Digital Power Meter DIGITAL POWER METER Digital Power Meter, (Model 66202).

Morando, S., Jemei, S., Hissel, D., Gouriveau, R., & Zerhouni, N. (2017). ANOVA method applied to proton exchange membrane fuel cell ageing forecasting using an echo state network. *Mathematics and Computers in Simulation*, 131, 283–294.

doi:10.1016/j.matcom.2015.06.009

Nishimura, K., Takasaki, T., & Sakai, T. (2013). Introduction of large-sized nickel-metal hydride battery GIGACELL?? for industrial applications. *Journal of Alloys and Compounds*, 580(SUPPL1), 353–358. doi:10.1016/j.jallcom.2013.01.166

Nuñez, M., Correa, J., Herrera, G., Gómez, P., Morón, S., & Fonseca, N. (2018). Estudio de percepción sobre energía limpia y auto sostenible. *IJMSOR: International Journal of Management Science & Operation Research*, 3(1), 11-15. Recuperado a partir de <http://ijmsoridi.com/index.php/ijmsor/article/view/89>

Ordóñez, C. P. (2011). Estudio de baterías para vehículos eléctricos. *Enterprise.Uc3M.Es*, 1–105. Retrieved from

[http://enterprise.uc3m.es/redmine/files/101115153006\\_CV\\_MDdelamata.pdf](http://enterprise.uc3m.es/redmine/files/101115153006_CV_MDdelamata.pdf)  
<http://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/11805>

Ospino-Castro, A. (2010). Análisis del potencial energético solar en la Región Caribe para el diseño de un sistema fotovoltaico. *INGECUC*, 6(6), 0–8.

## PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA

- Palamutcu, S. (2010). Electric energy consumption in the cotton textile processing stages. *Energy*, 35(7), 2945–2952. doi:10.1016/j.energy.2010.03.029
- Pavlov, D. (2011). *and Technology and its Influence on the Product*.
- Pavlov, D. (2011). *Lead-acid batteries: Science and technology. A handbook of lead-acid battery technology and its Influence on the product*. Amsterdam.
- Payne, J. (2001). Communication; Applications.
- Picazo-Ródenas, M. J., Royo, R., Antonino-Daviu, J., & Roger-Folch, J. (2013). Use of the infrared data for heating curve computation in induction motors: Application to fault diagnosis. *Engineering Failure Analysis*, 35, 178–192.  
doi:10.1016/j.engfailanal.2013.01.018
- Ponce-Silva, M., & Moreno-Basaldúa, E. A. (2015). Alternative definitions of energy for power meters in non-sinusoidal systems. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 64, 1206–1213. doi:10.1016/j.ijepes.2014.09.019
- Posch, A., Brudermann, T., Braschel, N., & Gabriel, M. (2015). Strategic energy management in energy-intensive enterprises: A quantitative analysis of relevant factors in the Austrian paper and pulp industry. *Journal of Cleaner Production*, 90, 291–299.  
doi:10.1016/j.jclepro.2014.11.044
- Prout, L. (1993). Aspects of lead / acid battery technology 4. Plate Formation. *Journal of Power Sources*, 41(1), 117–138. doi:10.1016/0378-7753(93)85012-D
- Putois, F. (1995). Market for nickel-cadmium batteries. *Journal of Power Sources*, 57(1-2), 67–70. doi:10.1016/0378-7753(95)02243-0
- Report Buyer Ltd. (2015). *Global and China Lead-acid Battery Industry Report, 2015-2018*.
- Rodríguez, L., Castellano, M., & Caridad, M. (2017). Planificación estratégica de recursos

## PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA

- humanos en empresas de consumo masivo. *IJMSOR: International Journal of Management Science & Operation Research*, 2(1), 38-43. Recuperado a partir de <http://ijmsoridi.com/index.php/ijmsor/article/view/84>
- Rudberg, M., Waldemarsson, M., & Lidestam, H. (2013). Strategic perspectives on energy management: A case study in the process industry. *Applied Energy*, 104, 487–496. doi:10.1016/j.apenergy.2012.11.027
- Rydh, C. J. (1999). Environmental assessment of vanadium redox and lead-acid batteries for stationary energy storage. *Journal of Power Sources*, 80(1), 21–29. doi:10.1016/S0378-7753(98)00249-3
- Rydh, C. J., & Sandén, B. A. (2005). Energy analysis of batteries in photovoltaic systems. Part I: Performance and energy requirements. *Energy Conversion and Management*, 46(11-12), 1957–1979. doi:10.1016/j.enconman.2004.10.003
- Scrosati, B., & Garche, J. (2010). Lithium batteries: Status, prospects and future. *Journal of Power Sources*, 195(9), 2419–2430. doi:10.1016/j.jpowsour.2009.11.048
- Soroko, M., & Howell, K. (2018). Infrared Thermography: Current Applications in Equine Medicine. *Journal of Equine Veterinary Science*, 60, 90–96.e2. doi:10.1016/j.jevs.2016.11.002
- Soto, J., Borroto, A., Bah, M. A., González, R., Curbelo, M., & Díaz, A. M. (2014). Diseño y aplicación de un procedimiento para la planificación energética según la NC-ISO 50001: 2011. *Ingeniería Energética*, XXXV(1), 38–47.
- Sullivan, J. L., & Gaines, L. (2012). Status of life cycle inventories for batteries. *Energy Conversion and Management*, 58, 134–148. doi:10.1016/j.enconman.2012.01.001
- Tang, K., Congedo, P. M., & Abgrall, R. (2016). Adaptive surrogate modeling by ANOVA and

## PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA

- sparse polynomial dimensional decomposition for global sensitivity analysis in fluid simulation. *Journal of Computational Physics*, 314, 557–589. doi:10.1016/j.jcp.2016.03.026
- Vine, E. (2005). An international survey of the energy service company ESCO industry. *Energy Policy*, 33(5), 691–704. doi:10.1016/j.enpol.2003.09.014
- Weinert, N., Chiotellis, S., & Seliger, G. (2011). Methodology for planning and operating energy-efficient production systems. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 60(1), 41–44. doi:10.1016/j.cirp.2011.03.015
- Wong, Y. S., Hurley, W. G., & Wölfle, W. H. (2008). Charge regimes for valve-regulated lead-acid batteries: Performance overview inclusive of temperature compensation. *Journal of Power Sources*, 183(2), 783–791. doi:10.1016/j.jpowsour.2008.05.069
- Xu, C., Xie, J., Huang, W., Chen, G., & Gong, X. (2018). Improving defect visibility in square pulse thermography of metallic components using correlation analysis. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 103, 162–173. doi:10.1016/j.ymsp.2017.09.030
- Yuasa Battery Inc. (2009). NP / NPH / NPX SERIES SEALED RECHARGEABLE LEAD-ACID BATTERIES.
- Y. De la Peña, G. Bordeth; H. Campo; & U. Murillo “Clean Energies: An Opportunity to Save the Planet”, IJMSOR, vol. 3, no. 1, pp. 21-25, 2018.  
<https://doi.org/10.17981/ijmsor.03.01.04>

# **Anexos**

## Anexo 1. Diferencia de tensión, corriente y potencia en el circuito 178.

Puntos de conexión	Clasificación	Diferencia de tensión (V)	Corriente (A)	Potencia (W)
1-38	Entrada del circuito	301,50	23,9	7205,83
1-2	Conductor entrada al circuito	0,7	23,9	16,73
37-38	Conductor salida del circuito	0,296	23,9	7,07
3-4	Conductor entre baterías	1,2	23,9	28,68
5-6	Conductor entre baterías	0,924	23,9	22,08
7-8	Conductor entre baterías	0,522	23,9	12,48
9-10	Conductor entre baterías	0,027	23,9	0,65
11-12	Conductor entre baterías	0,033	23,9	0,79
13-14	Conductor entre baterías	0,134	23,9	3,20
15-16	Conductor entre baterías	0,078	23,9	1,86
17-18	Conductor entre baterías	0,039	23,9	0,93
19-20	Conductor entre baterías	0,035	23,9	0,84
21-22	Conductor entre baterías	0,175	23,9	4,18
23-24	Conductor entre baterías	0,073	23,9	1,74
25-26	Conductor entre baterías	0,03	23,9	0,72
27-28	Conductor entre baterías	0,273	23,9	6,52
29-30	Conductor entre baterías	0,045	23,9	1,08
31-32	Conductor entre baterías	0,009	23,9	0,22
33-34	Conductor entre baterías	0,038	23,9	0,91
35-36	Conductor entre baterías	0,038	23,9	0,91

## PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA

2-3	Bornes de baterías	17,09	23,9	408,45
4-5	Bornes de baterías	15,76	23,9	376,66
6-7	Bornes de baterías	15,05	23,9	359,70
8-9	Bornes de baterías	15,75	23,9	376,43
10-11	Bornes de baterías	16,64	23,9	397,70
12-13	Bornes de baterías	17,53	23,9	418,97
14-15	Bornes de baterías	16,69	23,9	398,89
16-17	Bornes de baterías	16,90	23,9	403,91
18-19	Bornes de baterías	16,56	23,9	395,78
20-21	Bornes de baterías	16,93	23,9	404,63
22-23	Bornes de baterías	16,63	23,9	397,46
24-25	Bornes de baterías	16,42	23,9	392,44
26-27	Bornes de baterías	15,89	23,9	379,77
28-29	Bornes de baterías	16,51	23,9	394,59
30-31	Bornes de baterías	16,98	23,9	405,82
32-33	Bornes de baterías	16,53	23,9	395,07
34-35	Bornes de baterías	16,07	23,9	384,07
36-37	Bornes de baterías	16,90	23,9	403,91

*Nota:* Elaboración propia



## Anexo 2. Diferencia de tensión, corriente y potencia en el circuito 179.

Puntos de conexión	Clasificación	Diferencia de tensión (V)	Corriente (A)	Potencia (W)
1-38	Entrada del circuito	307,60	24,2	7443,92
1-2	Conductor entrada al circuito	0,018	24,2	0,44
37-38	Conductor salida del circuito	0,227	24,2	5,49
3-4	Conductor entre baterías	0,21	24,2	5,08
5-6	Conductor entre baterías	0,036	24,2	0,87
7-8	Conductor entre baterías	0,44	24,2	10,65
9-10	Conductor entre baterías	0,282	24,2	6,82
11-12	Conductor entre baterías	0,038	24,2	0,92
13-14	Conductor entre baterías	0,353	24,2	8,54
15-16	Conductor entre baterías	0,002	24,2	0,05
17-18	Conductor entre baterías	0,152	24,2	3,68
19-20	Conductor entre baterías	0,083	24,2	2,01
21-22	Conductor entre baterías	0,739	24,2	17,88
23-24	Conductor entre baterías	0,061	24,2	1,48
25-26	Conductor entre baterías	0,891	24,2	21,56
27-28	Conductor entre baterías	0,049	24,2	1,19
29-30	Conductor entre baterías	0,099	24,2	2,40
31-32	Conductor entre baterías	0,047	24,2	1,14
33-34	Conductor entre baterías	0,048	24,2	1,16

## PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA

35-36	Conductor entre baterías	0,052	24,2	1,26
2-3	Bornes de baterías	16,74	24,2	405,17
4-5	Bornes de baterías	16,89	24,2	408,80
6-7	Bornes de baterías	16,81	24,2	406,86
8-9	Bornes de baterías	16,86	24,2	408,07
10-11	Bornes de baterías	16,63	24,2	402,50
12-13	Bornes de baterías	16,50	24,2	399,36
14-15	Bornes de baterías	16,69	24,2	403,96
16-17	Bornes de baterías	16,94	24,2	410,01
18-19	Bornes de baterías	16,97	24,2	410,73
20-21	Bornes de baterías	17,39	24,2	420,90
22-23	Bornes de baterías	16,95	24,2	410,25
24-25	Bornes de baterías	16,98	24,2	410,97
26-27	Bornes de baterías	16,83	24,2	407,34
28-29	Bornes de baterías	16,85	24,2	407,83
30-31	Bornes de baterías	16,72	24,2	404,68
32-33	Bornes de baterías	17,01	24,2	411,70
34-35	Bornes de baterías	16,85	24,2	407,83
36-37	Bornes de baterías	17,12	24,2	414,36

*Nota:* Elaboración propia

## Anexo 3. Diferencia de tensión, corriente y potencia en el circuito 205.

Puntos de conexión	Clasificación	Diferencia de tensión (V)	Corriente (A)	Potencia (W)
1-38	Entrada del circuito	304,11	19	5778,11
1-2	Conductor entrada al circuito	0,072	19	1,37
37-38	Conductor salida del circuito	0,049	19	0,93
3-4	Conductor entre baterías	0,038	19	0,72
5-6	Conductor entre baterías	0,045	19	0,86
7-8	Conductor entre baterías	0,036	19	0,68
9-10	Conductor entre baterías	0,047	19	0,89
11-12	Conductor entre baterías	0,039	19	0,74
13-14	Conductor entre baterías	0,036	19	0,68
15-16	Conductor entre baterías	0,031	19	0,59
17-18	Conductor entre baterías	0,031	19	0,59
19-20	Conductor entre baterías	0,531	19	10,09
21-22	Conductor entre baterías	0,001	19	0,02
23-24	Conductor entre baterías	0,06	19	1,14
25-26	Conductor entre baterías	0,107	19	2,03
27-28	Conductor entre baterías	0,123	19	2,34
29-30	Conductor entre baterías	0,031	19	0,59
31-32	Conductor entre baterías	0,003	19	0,06
33-34	Conductor entre baterías	0,066	19	1,25
35-36	Conductor entre baterías	0,115	19	2,19

## PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA

2-3	Bornes de baterías	16,88	19	320,72
4-5	Bornes de baterías	17,18	19	326,42
6-7	Bornes de baterías	16,81	19	319,39
8-9	Bornes de baterías	16,33	19	310,27
10-11	Bornes de baterías	16,70	19	317,30
12-13	Bornes de baterías	16,88	19	320,72
14-15	Bornes de baterías	16,82	19	319,58
16-17	Bornes de baterías	16,78	19	318,82
18-19	Bornes de baterías	16,84	19	319,96
20-21	Bornes de baterías	16,90	19	321,10
22-23	Bornes de baterías	16,85	19	320,15
24-25	Bornes de baterías	16,85	19	320,15
26-27	Bornes de baterías	16,93	19	321,67
28-29	Bornes de baterías	16,83	19	319,77
30-31	Bornes de baterías	16,93	19	321,67
32-33	Bornes de baterías	16,42	19	311,98
34-35	Bornes de baterías	16,89	19	320,91
36-37	Bornes de baterías	16,83	19	319,77

*Nota:* Elaboración propia

## Anexo 4. Diferencia de tensión, corriente y potencia en el circuito 208.

Puntos de conexión	Clasificación	Diferencia de tensión (V)	Corriente (A)	Potencia (W)
1-38	Entrada del circuito	307,10	19	5834,98
1-2	Conductor entrada al circuito	0,051	19	0,97
37-38	Conductor salida del circuito	0,191	19	3,63
3-4	Conductor entre baterías	0,15	19	2,85
5-6	Conductor entre baterías	0,226	19	4,29
7-8	Conductor entre baterías	0,79	19	15,01
9-10	Conductor entre baterías	0,095	19	1,81
11-12	Conductor entre baterías	0,271	19	5,15
13-14	Conductor entre baterías	0,0931	19	1,77
15-16	Conductor entre baterías	0,033	19	0,63
17-18	Conductor entre baterías	0,076	19	1,44
19-20	Conductor entre baterías	0,102	19	1,94
21-22	Conductor entre baterías	0,032	19	0,61
23-24	Conductor entre baterías	0,046	19	0,87
25-26	Conductor entre baterías	0,066	19	1,25
27-28	Conductor entre baterías	0,172	19	3,27
29-30	Conductor entre baterías	0,469	19	8,91
31-32	Conductor entre baterías	0,013	19	0,25
33-34	Conductor entre baterías	0,078	19	1,48
35-36	Conductor entre baterías	0,03	19	0,57

## PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA

2-3	Bornes de baterías	17,20	19	326,80
4-5	Bornes de baterías	17,02	19	323,38
6-7	Bornes de baterías	17,15	19	325,85
8-9	Bornes de baterías	17,13	19	325,47
10-11	Bornes de baterías	17,11	19	325,09
12-13	Bornes de baterías	16,88	19	320,72
14-15	Bornes de baterías	17,13	19	325,47
16-17	Bornes de baterías	17,16	19	326,04
18-19	Bornes de baterías	17,11	19	325,09
20-21	Bornes de baterías	17,06	19	324,14
22-23	Bornes de baterías	16,48	19	313,12
24-25	Bornes de baterías	17,11	19	325,09
26-27	Bornes de baterías	17,13	19	325,47
28-29	Bornes de baterías	16,25	19	308,75
30-31	Bornes de baterías	16,26	19	308,94
32-33	Bornes de baterías	16,65	19	316,35
34-35	Bornes de baterías	16,75	19	318,25
36-37	Bornes de baterías	16,54	19	314,26

*Nota:* Elaboración propia

## Anexo 5. Diferencia de tensión, corriente y potencia en el circuito 209.

Puntos de conexión	Clasificación	Diferencia de tensión (V)	Corriente (A)	Potencia (W)
1-38	Entrada del circuito	303,62	18,8	5708,07
1-2	Conductor entrada al circuito	0,048	18,8	0,90
37-38	Conductor salida del circuito	0,051	18,8	0,96
3-4	Conductor entre baterías	0,561	18,8	10,55
5-6	Conductor entre baterías	0,937	18,8	17,62
7-8	Conductor entre baterías	0,359	18,8	6,75
9-10	Conductor entre baterías	0,185	18,8	3,48
11-12	Conductor entre baterías	0,047	18,8	0,88
13-14	Conductor entre baterías	0,491	18,8	9,23
15-16	Conductor entre baterías	0,235	18,8	4,42
17-18	Conductor entre baterías	0,435	18,8	8,18
19-20	Conductor entre baterías	0,46	18,8	8,65
21-22	Conductor entre baterías	0,06	18,8	1,13
23-24	Conductor entre baterías	0,066	18,8	1,24
25-26	Conductor entre baterías	0,001	18,8	0,02
27-28	Conductor entre baterías	0,396	18,8	7,44
29-30	Conductor entre baterías	0,097	18,8	1,82
31-32	Conductor entre baterías	0,06	18,8	1,13
33-34	Conductor entre baterías	0,092	18,8	1,73
35-36	Conductor entre baterías	0,001	18,8	0,02

## PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA

2-3	Bornes de baterías	17,66	18,8	332,01
4-5	Bornes de baterías	17,03	18,8	320,16
6-7	Bornes de baterías	15,24	18,8	286,51
8-9	Bornes de baterías	15,89	18,8	298,73
10-11	Bornes de baterías	17,63	18,8	331,44
12-13	Bornes de baterías	17,16	18,8	322,61
14-15	Bornes de baterías	17,30	18,8	325,24
16-17	Bornes de baterías	16,52	18,8	310,58
18-19	Bornes de baterías	16,00	18,8	300,80
20-21	Bornes de baterías	16,07	18,8	302,12
22-23	Bornes de baterías	17,00	18,8	319,60
24-25	Bornes de baterías	16,08	18,8	302,30
26-27	Bornes de baterías	17,22	18,8	323,74
28-29	Bornes de baterías	17,08	18,8	321,10
30-31	Bornes de baterías	15,84	18,8	297,79
32-33	Bornes de baterías	16,16	18,8	303,81
34-35	Bornes de baterías	16,04	18,8	301,55
36-37	Bornes de baterías	17,17	18,8	322,80

*Nota:* Elaboración propia



## Anexo 6. Pérdidas de los conductores circuito 178.

Puntos de conexión	Clasificación	Pérdidas (W)
1-2	Conductor entrada al circuito	16,73
37-38	Conductor salida del circuito	7,07
3-4	Conductor entre baterías	28,68
5-6	Conductor entre baterías	22,08
7-8	Conductor entre baterías	12,48
9-10	Conductor entre baterías	0,65
11-12	Conductor entre baterías	0,79
13-14	Conductor entre baterías	3,20
15-16	Conductor entre baterías	1,86
17-18	Conductor entre baterías	0,93
19-20	Conductor entre baterías	0,84
21-22	Conductor entre baterías	4,18
23-24	Conductor entre baterías	1,74
25-26	Conductor entre baterías	0,72
27-28	Conductor entre baterías	6,52
29-30	Conductor entre baterías	1,08
31-32	Conductor entre baterías	0,22
33-34	Conductor entre baterías	0,91
35-36	Conductor entre baterías	0,91
	Total	111,59

*Nota:* Elaboración propia

## Anexo 7. Pérdidas de los conductores circuito 179.

Puntos de conexión	Clasificación	Pérdidas (W)
1-2	Conductor entrada al circuito	0,44
37-38	Conductor salida del circuito	5,49
3-4	Conductor entre baterías	5,08
5-6	Conductor entre baterías	0,87
7-8	Conductor entre baterías	10,65
9-10	Conductor entre baterías	6,82
11-12	Conductor entre baterías	0,92
13-14	Conductor entre baterías	8,54
15-16	Conductor entre baterías	0,05
17-18	Conductor entre baterías	3,68
19-20	Conductor entre baterías	2,01
21-22	Conductor entre baterías	17,88
23-24	Conductor entre baterías	1,48
25-26	Conductor entre baterías	21,56
27-28	Conductor entre baterías	1,19
29-30	Conductor entre baterías	2,40
31-32	Conductor entre baterías	1,14
33-34	Conductor entre baterías	1,16
35-36	Conductor entre baterías	1,26
	Total	92,61

*Nota:* Elaboración propia

## Anexo 8. Pérdidas de los conductores circuito 205.

Puntos de conexión	Clasificación	Pérdidas (W)
1-2	Conductor entrada al circuito	1,37
37-38	Conductor salida del circuito	0,93
3-4	Conductor entre baterías	0,72
5-6	Conductor entre baterías	0,86
7-8	Conductor entre baterías	0,68
9-10	Conductor entre baterías	0,89
11-12	Conductor entre baterías	0,74
13-14	Conductor entre baterías	0,68
15-16	Conductor entre baterías	0,59
17-18	Conductor entre baterías	0,59
19-20	Conductor entre baterías	10,09
21-22	Conductor entre baterías	0,02
23-24	Conductor entre baterías	1,14
25-26	Conductor entre baterías	2,03
27-28	Conductor entre baterías	2,34
29-30	Conductor entre baterías	0,59
31-32	Conductor entre baterías	0,06
33-34	Conductor entre baterías	1,25
35-36	Conductor entre baterías	2,19
	Total	27,76

*Nota:* Elaboración propia

## Anexo 9. Pérdidas de los conductores circuito 208.

Puntos de conexión	Clasificación	Pérdidas (W)
1-2	Conductor entrada al circuito	0,97
37-38	Conductor salida del circuito	3,63
3-4	Conductor entre baterías	2,85
5-6	Conductor entre baterías	4,29
7-8	Conductor entre baterías	15,01
9-10	Conductor entre baterías	1,81
11-12	Conductor entre baterías	5,15
13-14	Conductor entre baterías	1,77
15-16	Conductor entre baterías	0,63
17-18	Conductor entre baterías	1,44
19-20	Conductor entre baterías	1,94
21-22	Conductor entre baterías	0,61
23-24	Conductor entre baterías	0,87
25-26	Conductor entre baterías	1,25
27-28	Conductor entre baterías	3,27
29-30	Conductor entre baterías	8,91
31-32	Conductor entre baterías	0,25
33-34	Conductor entre baterías	1,48
35-36	Conductor entre baterías	0,57
	Total	56,70

*Nota:* Elaboración propia

## Anexo 10. Pérdidas de los conductores circuito 209.

Puntos de conexión	Clasificación	Pérdidas (W)
1-2	Conductor entrada al circuito	0,90
37-38	Conductor salida del circuito	0,96
3-4	Conductor entre baterías	10,55
5-6	Conductor entre baterías	17,62
7-8	Conductor entre baterías	6,75
9-10	Conductor entre baterías	3,48
11-12	Conductor entre baterías	0,88
13-14	Conductor entre baterías	9,23
15-16	Conductor entre baterías	4,42
17-18	Conductor entre baterías	8,18
19-20	Conductor entre baterías	8,65
21-22	Conductor entre baterías	1,13
23-24	Conductor entre baterías	1,24
25-26	Conductor entre baterías	0,02
27-28	Conductor entre baterías	7,44
29-30	Conductor entre baterías	1,82
31-32	Conductor entre baterías	1,13
33-34	Conductor entre baterías	1,73
35-36	Conductor entre baterías	0,02
	Total	86,14

*Nota:* Elaboración propia