

EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DEL CONSUMO DE GAS PARA GENERACIÓN
DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN COLOMBIA CON BASE A LA NORMA ISO 50000



MONOGRAFIA PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

ESTEBAN LUIS CELIS BARRIOS

ANGEL MIGUEL PEÑATA DORADO

DIRECTOR

Ing. ARNOLD RAFAEL MARTINEZ GUARIN MS.c, PhD.c.

CODIRECTOR

Ing. JESUS DAVID RHENALS JULIO MS.c.

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

FACULTAD DE INGENIERÍA

INGENIERÍA MECÁNICA

MONTERÍA 2021

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	5
ABSTRACT	6
2. OBJETIVO GENERAL Y ESPECIFICOS	10
2.1 OBJETIVO GENERAL	10
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	10
3. MARCO TEÓRICO	11
4. ANTECEDENTES	18
5. METODOLOGÍA	26
6. RESULTADOS	30
7. ANÁLISIS DE RESULTADOS	46
8. CONCLUSIONES	50
9. BIBLIOGRAFÍA	51
10. ANEXOS	58

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Características centrales seleccionadas.	31
Tabla 2. Ecuaciones de línea de tendencia y R^2 para las centrales termoeléctricas.	32
Tabla 3. Ecuaciones lineales y R^2 para Tebsab.....	35
Tabla 4.. Ecuaciones lineales y R^2 para Flores IV.....	36
Tabla 5. Ecuaciones lineales y R^2 para Termosierrab.....	37
Tabla 6. Ecuaciones lineales y R^2 para Termoyopal 2.....	38
Tabla 7 . Ecuaciones lineales y R^2 para Flores 1.	38
Tabla 8. Ecuaciones lineales y R^2 para Proelectrica 1.	39
Tabla 9. Porcentajes de ahorro y de deterioro calculados para las centrales termoeléctricas.	40
Tabla 10 . Gráfico indicador base 100 y CUSUM de izquierda a derecha, para las termoeléctricas evaluadas.	43
Tabla 11 . Producción crítica para varias centrales termoeléctricas a gas en Colombia.	45
Tabla 12. Proceso de filtrado para los datos generación de energía y consumo de gas para TEBSAB.....	58
Tabla 13. Proceso de filtrado para los datos generación de energía y consumo de gas para FLORES IV.....	60
Tabla 14. Proceso de filtrado para los datos generación de energía y consumo de gas para TERMOSIERRA.....	60
Tabla 15. Proceso de filtrado para los datos generación de energía y consumo de gas para TERMOYOPAL.....	61

Tabla 16. Proceso de filtrado para los datos generación de energía y consumo de gas para FLORES 1.	62
Tabla 17. Proceso de filtrado para los datos generación de energía y consumo de gas para PROELECTRICA.	63

RESUMEN

En este estudio monográfico se evaluó el consumo de gas para la generación de energía en las centrales termoeléctricas de Colombia. Primeramente, se realizó una revisión bibliográfica para tener contexto de cómo avanzan los estudios sobre eficiencia en termoeléctricas, hoteles e industrias siguiendo la metodología ISO 50000. Para la evaluación se tomaron datos de consumo de gas y generación de energía ofrecidos por la pagina XM, con estos datos se construyó un diagrama de Pareto con el fin de centrarse en las termoeléctricas de mayor consumo de gas, los datos de cada central escogidos se filtraron utilizando el método de la Desviación Mediana Absoluta, estos ya filtrados se utilizaron para elaborar una línea base energética y obtener una ecuación normalizada, con la ayuda de esta ecuación se estimaron porcentajes de ahorro, generación critica de energía y algunos indicadores de desempeño energéticos establecidos en la norma ISO 50001 y 50006. Los resultados del estudio mostraron que la central TEBSAB ha consumido 51.50% del combustible de los últimos tres años y esta presenta un potencial de ahorro del 5,9%, en las centrales FLORES IV, FLORES 1 y PROELECTRICA tienen un mayor porcentaje de ahorro 15,95%, 18,06% y 15,34% respectivamente, el cual puede explicarse por medio del indicador de base cien, donde se muestra que estas centrales tienen una variación continúa entre valores de desempeño conforme y no conforme.

Palabras clave: ISO 50001, Desviación mediana absoluta, Porcentaje de ahorro, Generación crítica y Diagrama de suma acumulada.

ABSTRACT

In this monographic study, gas consumption for power generation in thermoelectric plants in Colombia was evaluated. First, a bibliographic review was carried out to have context of how the studies on efficiency in thermoelectric plants, hotels and industries are progressing following the ISO 50000 methodology. For the evaluation, gas consumption and power generation data offered by the XM page were taken, with these data a Pareto diagram was built in order to focus on the thermoelectric plants with the highest gas consumption, the data of each chosen central was Filtered using the Absolute Median Deviation method, these already filtered were used to elaborate an energy baseline and obtain a normalized equation, with the help of this equation, savings percentages, critical energy generation and some established energy performance indicators were estimated. in ISO 50001 and 50006. The results of the study showed that the TEBSAB plant has consumed 51.50% of the fuel in the last three years and this presents a potential saving of 5.9%, the FLORES IV, FLORES 1 and PROELECTRICA plants have a higher percentage of savings 15, 95 %, 18.06% and 15.34% respectively, which can be explained by means of the one hundred base indicator, where it is shown that these plants have a continuous variation between compliant and non-compliant performance values.

Keywords: ISO 50001, Absolute Median Deviation, Savings percentage, Critical Generation, and Cumulative Sum Diagram.

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos tiempos el uso eficiente y racional de la energía ha pasado a ser un elemento importante dentro de la planificación energética de los países, así como de los diversos sectores y tipos de usuarios que tienen la energía como insumo dentro de su proceso productivo y por ende en su producto final. La adopción de esquemas de uso eficiente y racional de la energía dentro de la composición de las matrices energéticas permite aumentar los niveles de competitividad, minimizar el consumo de energía, crear nuevas fuentes y nichos de actuación industrial y comercial y reducir la huella de carbono de los países (Briano et al., 2016).

En el plan energético nacional 2020-2050 (PEN) de Colombia plantea como objetivo diversificar la matriz energética, buscando minimizar el riesgo de desabastecimiento mediante el uso de recursos locales, de nuevos energéticos y de tecnologías que complementen la matriz actual y el acceso a los flujos de comercio internacional (Upme, 2020). Una iniciativa que busca cumplir a este objetivo es la sustitución de combustibles líquidos por medio de la gasificación, el cual es un paso hacia la descarbonización, para asegurar el suministro de este recurso se están evaluando iniciativas para la importación de gas al país. El estudio técnico para el plan de abastecimiento de gas natural (Upme, 2020) muestra que el balance entre la oferta de gas local y demanda estimada podría ser deficitario entre 2023-2028, dando que se proyecta un aumento de 150 GBTUD a 230 GBTUD (Umpe, 2015), solo en el sector termoeléctrico, mientras que en los otros sectores se proyecta un aumento mayor en el consumo, por ello se recomienda contar con infraestructura de importación (Upme, 2020). Dado este escenario es importante revisar la eficiencia energética (EE) de las plantas térmicas a gas.

En ese sentido, los estudios de EE tienen una alta importancia para dar respuesta a esta problemática, estos se consideran como el mejor método para lograr los objetivos de reducción tanto del consumo energético como de la generación de gases efecto invernadero en (Fernández, 2021). Mejorar la EE, permite incrementar la productividad asegurando un uso eficiente de materias primas materiales, energía y agua, promoviendo un mejor desempeño ambiental a través de la reducción de residuos y emisiones en origen (Cabello Eras et al., 2016).

La EE, está definida como el uso eficiente de la energía, es decir, las acciones y prácticas que permiten “hacer más con menos”, optimizando la relación entre energía consumida y los productos o servicios finales obtenidos; todo esto sin sacrificar la producción, su calidad o niveles de confort (Daniel, 2020). El incremento en la eficiencia puede ampliar la productividad de los recursos básicos de energía. (Kreith, 2011). La EE se integra a un concepto más amplio, conocido como desempeño energético, el cual incluye adicionalmente el uso de la energía, su consumo y su intensidad.

Sumado a los estudios de EE, están los Sistemas de Gestión de la Energía (SGE), basados en la Norma ISO 50001, estos involucran una continua verificación de las acciones implementadas, un proceso de realimentación y corrección de la política energética para una mejor gestión de los recursos dentro de las organizaciones (Fichera et al., 2020).

En atención a lo expuesto, se presentan a través de la literatura las diferentes metodologías para evaluar la eficiencia energética en el consumo de gas en Colombia, las cuales sirven de soporte para la realización del trabajo propuesto. El interés por llevar a cabo el presente trabajo surge debido a la falta de estudios sobre eficiencia energética en las termoeléctricas impide conocer el estado real de la producción de energía a partir

de gas en el país, esto limita la posibilidad de aplicar métodos para aprovechar eficientemente la energía.

2. OBJETIVO GENERAL Y ESPECIFICOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Analizar la eficiencia del consumo de gas para la generación de energía en Colombia con base a la norma ISO 50000.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Establecer una línea base para la eficiencia energética en la generación de energía eléctrica en centrales termoeléctricas a gas en Colombia a través de la metodología ISO 50000.
2. Calcular indicadores de desempeño energético en las centrales termoeléctricas a gas con mayor consumo global de las centrales evaluadas.
3. Diseñar un plan de acción para generación eficiente de energía en termoeléctricas a gas en Colombia.

3. MARCO TEÓRICO

FAMILIA DE NORMAS ISO 50000

La familia de normas ISO 50000 han sido adoptados como normas o guías técnicas que abarcan las temáticas de ahorro de la energía y gestión de la energía. En la figura 1, se indica a qué fase del ciclo PHVA aporta principalmente cada norma, las que están dentro de un cuadro de color amarillo han sido adoptados como normas o guías técnicas en Colombia. Dentro de las normas publicadas, hay algunas que no se centran en la implementación de un SGE, sino que se enfocan en aspectos específicos para algunos actores de interés, estas se muestran en el cuadro rojo de la parte inferior. El presente estudio monográfico se limitó a la utilización de las normas ISO 50001 y 50006, por el alcance de la evaluación realizada.

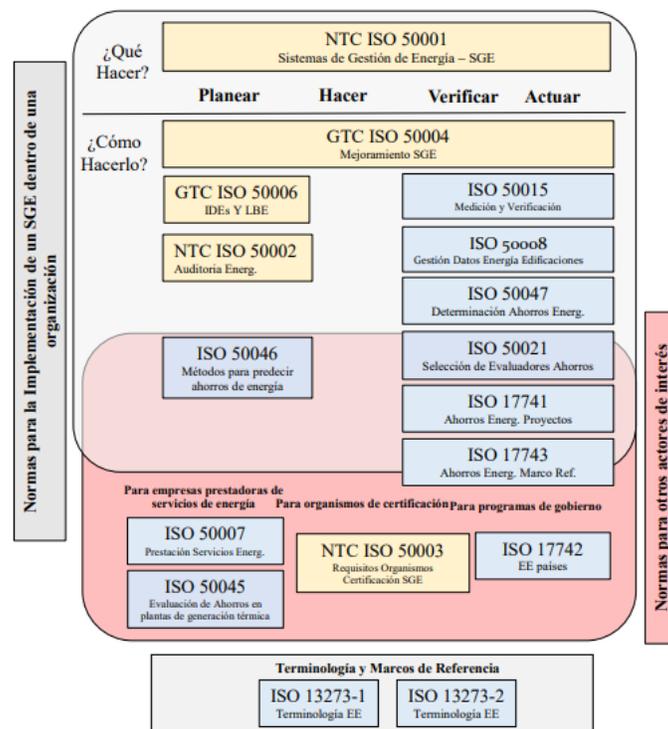


Figura 1. Esquema de los documentos que componen la familia de normas ISO 50000 (Prias et al., 2019).

Norma ISO 50001 Sistemas de Gestión de Energía (SGE): Esta Norma Internacional facilita a las organizaciones establecer los sistemas y/o procesos necesarios para mejorar su desempeño energético, incluyendo la eficiencia energética, el uso y el consumo de la energía; su implementación está orientada finalmente a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, de los costos de la energía y de otros impactos ambientales relacionados (Castrillón et al., 2018); objetivos primordiales para alcanzar una producción más limpia en el sector industrial. La estructura de un SGE corresponde con los enfoques y actividades relacionadas con la implementación, operación y mantenimiento de un sistema de gestión de acuerdo con la metodología PHVA (Planear, Hacer, Verificar, Actuar).

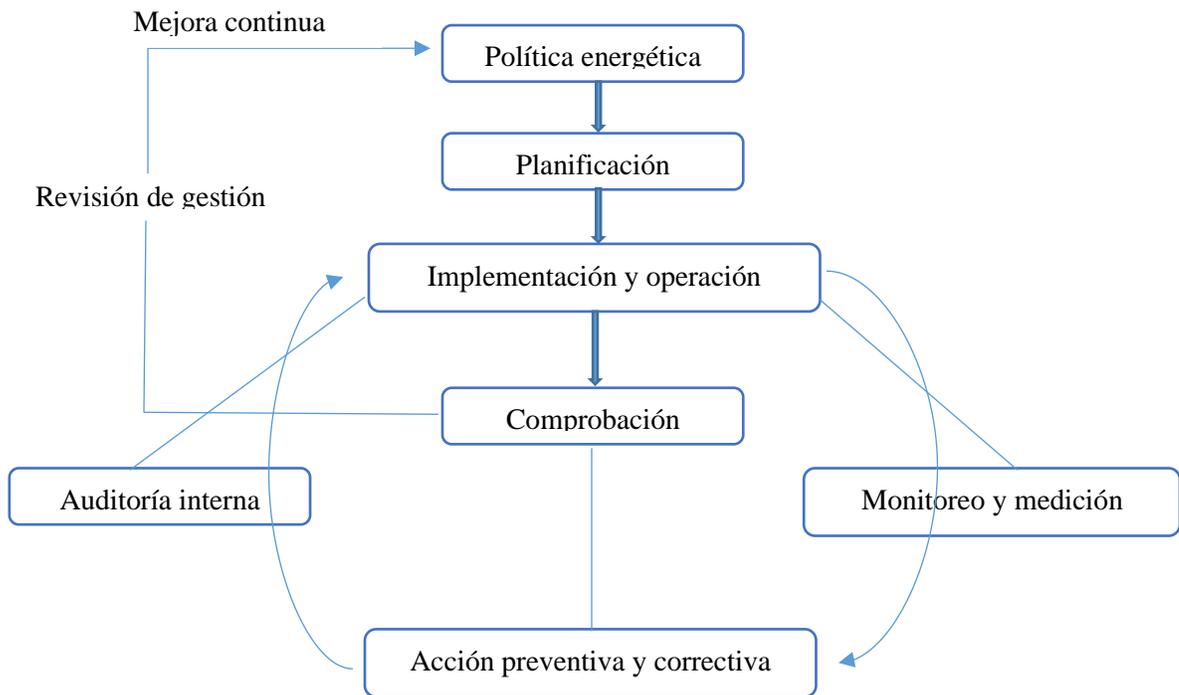


Figura 2. Enfoque sistemático de la norma ISO 50001.

Norma ISO 50006 Líneas de base energéticas e indicadores de desempeño: Esta norma brinda a las organizaciones una guía para el cumplimiento de los requisitos relacionados con el establecimiento, uso y mantenimiento de la línea de base energética (LBE) y los Indicadores De Desempeño Energético (IDE), por medio de la presentación de las variables importantes para la medición del desempeño energético y las herramientas prácticas para su evaluación.

La LBE es una referencia que caracteriza y cuantifica el desempeño energético de una organización durante un período de tiempo especificado. La LBE permite a una organización evaluar los cambios en el desempeño energético entre períodos seleccionados. La LBE también se utiliza para el cálculo del ahorro de energía, como referencia antes y después de implementación de acciones de mejora de desempeño energético (ISO 50006, 2014).

Los IDE son una medida o unidad de desempeño energético determinada por la organización que permiten monitorear y controlar los procesos en los que se evalúa el desempeño. Adicionalmente, alertan sobre las desviaciones, y pueden correlacionarse en el tiempo en función de los cambios de las variables relevantes que afectan el desempeño energético. De igual manera pueden emplearse como indicadores de efectividad para verificar los resultados obtenidos en desempeño energético con respecto a lo deseado, al compararse con una línea de base energética. En la figura 3 se muestra como se relacionan los IDE con la LBE y las metas. La línea meta se construye a partir de los valores filtrados de consumo y producción de las operaciones ubicadas debajo de la línea base, con esto se construye otra ecuación lineal de consumo vs producción, que representa el comportamiento del consumo de

energía para las operaciones de mejor desempeño. Esta se denomina ecuación de la línea meta. Con el mismo procedimiento anterior puede construirse una línea de deterioro para las operaciones de peor desempeño, con los datos de consumo y producción de las operaciones ubicadas por encima de la línea base, y dando como resultado una ecuación denominada línea de deterioro.

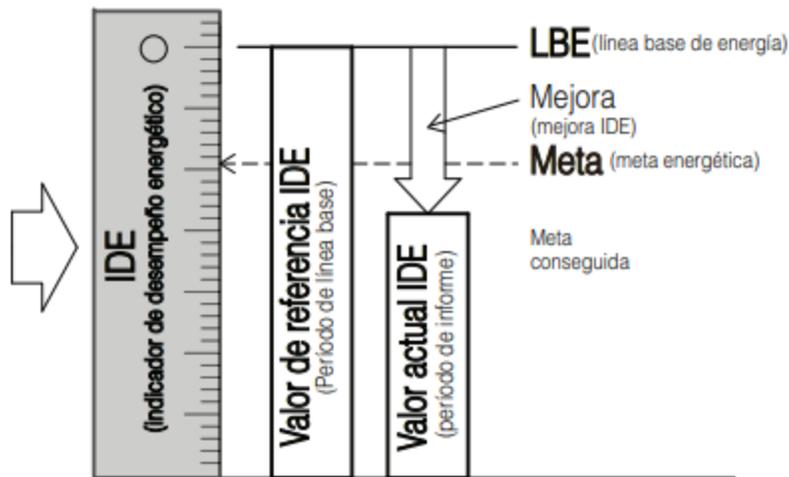


Figura 3. Relación entre desempeño energético, IDEs, LBEs y metas energéticas obtenido de la norma ISO 50006.

Para este estudio es viable la aplicación de IDEs como: Indicador de producción crítica, calculado a partir de la producción dividida entre el consumo de energético estimado a partir de la ecuación de la LBE, mediante este IDE se puede conocer el valor de producción, a partir del cual esta se ve afectado por la energía no asociada a la producción, la cual es un componente de la ecuación normalizada de la LBE (Ej. Pérdidas constantes de energía + energía almacenada + energía en arranques y paradas típicos + etc.). Otro IDE viable para este estudio es el indicador base 100, es un indicador de gestión energética que refleja el comportamiento de los resultados del desempeño energético respecto a la línea de base energética tomando como

cumplimiento el valor 100 (es decir, el valor 100 indica un valor igual al de la línea base). Por último, el indicador de tendencia del desempeño Energético, calculado mediante técnica estadística de suma acumulada (CUSUM), consiste en conocer cuál es la tendencia acumulada de las desviaciones del consumo de energía real respecto a la LBE. El propósito principal de esta herramienta estadística, es el análisis de eventuales discrepancias existentes entre los valores esperados (derivados del LBE) y los valores reales del IDE y registrados a lo largo del tiempo (Cabello Eras et al., 2020). El valor de cada diferencia puede ser aleatoriamente positivo o negativo; sin embargo, sobre todo, al acumular estas diferencias es posible interpretar cualquier cambio en la pendiente del CUSUM como una mejora (tendencia decreciente) o un empeoramiento (tendencia creciente) de los rendimientos energéticos.

MERCADO ENERGÉTICO COLOMBIANO

El sector eléctrico colombiano se fundamenta en el hecho de que las empresas comercializadoras y los grandes consumidores adquieren la energía y potencia en un mercado de grandes bloques de energía, el cual opera libremente de acuerdo con las condiciones de oferta y demanda. Para promover la competencia entre generadores, se permite la participación de agentes económicos, públicos y privados, los cuales deberán estar integrados al sistema interconectado para participar en el mercado de energía mayorista. Como contraparte comercializadores y grandes consumidores actúan celebrando contratos de energía eléctrica con los generadores. El precio de la electricidad en este mercado se establece de común acuerdo entre las partes contratantes, sin la intervención del Estado. La operación y la administración del

mercado la realiza XM, el cual tiene a su cargo las funciones de Centro Nacional de Despacho (CND), Administrador del Sistema de Intercambios Comerciales (ASIC) y Liquidador y Administrador de Cuentas de cargos por Uso de las Redes del SIN (LAC) (XM, 2021).

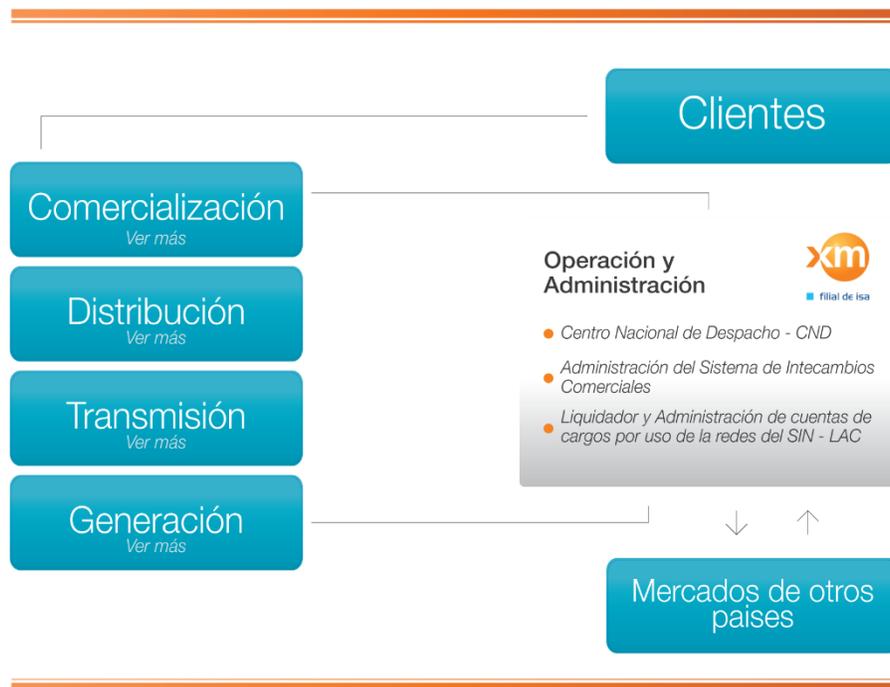


Figura 4. Esquema mercado eléctrico colombiano (XM, 2021).

XM coordina la operación de la cadena productiva del sector eléctrico colombiano, realizando la planeación de los recursos de generación de Colombia. Esta planeación se realiza a corto, mediano y largo plazo. La planeación de corto plazo del despacho Económico de Generación de Energía, comprende la recepción de las ofertas diarias que presentan los generadores en la Bolsa de Energía, donde se asignan hora a hora las plantas que suministrarán la energía al día siguiente. XM, realiza esta selección con criterios de economía, calidad, seguridad y confiabilidad, lo cual se realiza con

base en las ofertas de precio y declaraciones de disponibilidad de los generadores y la disponibilidad de la infraestructura de transporte de electricidad.

4. ANTECEDENTES

La eficiencia energética, es un tema de mucha importancia, porque su enfoque se proyecta en el grado de aprovechamiento de la energía empleada para producir un trabajo u otro tipo de energía. La eficiencia energética es un concepto que todos debemos tener presente en nuestro día a día; ya sea desde un punto de vista particular en nuestros hogares como desde los distintos sectores productivos de la sociedad.

Partiendo de esa importancia, el trabajo monográfico Evaluación de la eficiencia del consumo de gas para generación de energía en Colombia con base en el Sistema General de Seguridad ISO 50000, está sustentado en la siguiente literatura:

Dzene et al., 2015, quienes en la aplicación de la norma ISO 50001 combinaron los esquemas tradicionales de gestión de la energía con las disposiciones de la norma mediante la aplicación de indicadores energéticos medibles. Los debates abordan cuestiones cruciales como la disponibilidad de datos energéticos, la falta de indicadores medibles en los planes de acción y desafíos en la aplicación de procedimientos estándar.

Cabello Eras et al., 2016. Proponen el uso de indicadores de rendimiento energético para evaluar y controlar el consumo eléctrico. El indicador considerado introduce la temperatura exterior. Con base en este indicador se desarrollan gráficos de control diario que permiten detección más rápida de sobreconsumos y malas prácticas hacia una mayor eficiencia eléctrica. Para aplicar la metodología se valen de la norma ISO 50004 y 50006, propuesta en una guía para la implementación, mantenimiento y mejora de un SGA, y para el uso de Energy Baselines (EnB) y de Energy Performance

Indicators (EnPI) como medida del desempeño energético. Este estudio sigue las pautas del paso de Planificación energética, incluido en la implementación de un SGA en ISO 50001, para definir el EnB, la línea de base de la meta (GB) y el EnPI.

Autores como Balitskiy et al., 2016, construyen un modelo multivariado que se origina en el modelo de crecimiento neoclásico y modificado para incluir el capital fijo bruto y el trabajo. Para ello implementan las pruebas de co-integración de panel y el modelado de corrección de errores para determinar si existe una causalidad a largo plazo entre el crecimiento económico y el consumo de gas natural.

Autores como McKane et al., 2017, proponen el estándar de gestión de energía ISO 50001, el cual proporciona un marco de mejora continua para que las organizaciones reduzcan su consumo. Sin embargo, ellos aclaran que no existe un proceso transparente y coherente para estimar el potencial de impactos de su implementación. Es por esto, que presenta la Metodología de Impactos ISO 50001, una metodología desarrollada internacionalmente, la cual proporciona un foro para que los responsables de la formulación de políticas refinen y fomenten el uso de la metodología. El consumo energético esta metodología de ISO 50001 generaría para el año 2030 ahorros acumulativos significativos de energía primaria.

Kanneganti et al., 2017, presentan un enfoque de evaluación energética, el cual se puede desarrollar fácilmente basándose en el protocolo de evaluación energética de la IAC y otros enfoques para no "reinventar" la rueda, sino concentrarse y refinar el proceso para generar una metodología de evaluación energética y un formato de presentación de informes adaptado a las necesidades de ISO 50001. Esta metodología de evaluación energética desarrollada integra el aspecto de reducción de energía de

una evaluación energética con los requisitos de las Secciones de Revisión energética a Objetivos, metas y planes de acción expuestos en la norma ISO 50001.

Autores como Kluczek & Olszewski, 2017, proponen la Auditoria energética como una herramienta para analizar el flujo de energía y evaluar el ahorro de energía, para obtener mejoras de eficiencia energética.

Finnerty et al., 2017, en su trabajo presenta el desarrollo e implementación de una madurez de gestión energética para organizaciones industriales multi-sitio con presencia global, considerado como un paso fundamental hacia la mejora continua y la eficiencia energética óptima.

Sunthornnapha, 2017, presenta un modelo de referencia energética confiable para la autoevaluación comparativa del potencial de ahorro de energía mediante el uso de método del perceptron multicapa (MLP). Como resultado determinaron, que el MLP clasifica mejor para la estimación del consumo de energía para las industrias manufactureras, seguido de la red de función de base radial y la máquina de vectores de soporte.

Con respecto a los trabajos elaborado por Sagastume Gutiérrez et al., 2018, estos proponen una metodología de gestión energética para abordar el consumo eléctrico en plomo-ácido en plantas de baterías, mejorando los estándares de eficiencia. La "producción de batería equivalente" se introduce en definir los criterios de rendimiento energético que deben cumplirse en las diferentes secciones de producción de la planta de baterías. La metodología además combina los lineamientos de la norma ISO 50001 con la gestión energética para plantas de fabricación. El

resultado es un enfoque estructurado para detectar ineficiencias y señalando sus fuentes. Los resultados arrojados en este estudio determinaron un ahorro representado en un 3,9% menos de electricidad de lo previsto por la línea de base energética.

Menghi et al., 2019, en sus trabajos realizan una revisión sistemática de la literatura de los métodos y herramientas de evaluación energética, que permita proporcionar a los académicos una imagen del estado actual de la investigación científica e identificar los trabajos científicos que podrían ayudar a los profesionales de la industria en la gestión de la energía, siguiendo el marco ISO 50001.

Autores como Xie et al., 2019, utilizaron el método de distancia direccional ponderada de Russell (WRDDM) para evaluar la eficiencia general de centrales térmicas. Los resultados obtenidos mostraron que la eficiencia es mayor en unas zonas que otras. Además, se discuten las correlaciones entre planta estatal o no estatal, escala y la eficiencia, donde las plantas no estatales con gran capacidad de generación han generado mayor eficiencia que las plantas pequeñas y estatales.

Poveda-Orjuela et al., 2019. Ellos se centran en la eficiencia energética a través de sistemas de gestión integral (CMS), y "pensamiento basado en riesgos y oportunidades", considerando la discusión sobre la revisión de la norma ISO 50001, el enfoque básico del modelo y la ruta para implementar CMS para la calidad, seguridad y salud en el lugar de trabajo, medio ambiente gestión, eficiencia energética y otros componentes de riesgo.

Castrillón-Mendoza et al., 2020, Proponen alternativas para el establecimiento de líneas de base energéticas para el sector industrial, para ello utilizan un método que

aplican al proceso de inyección de plástico y el resultado es una línea de base de energía (EBL) de acuerdo con el requisito de la norma ISO 50001, que sirve como referencia para determinar el ahorro de energía. El EBL Facilita la reducción del consumo de energía y las emisiones de gases de efecto invernadero en sectores como el plástico.

Fan et al., 2020, describen en su trabajo como la generación de energía de carbón de China ha representado una gran proporción del suministro de energía durante mucho tiempo y la contaminación ambiental resultante al igual que el desperdicio de recursos han obstaculizado el desarrollo sostenible de la industria de la energía. Por ello, proponen como solución a dicha problemática parten de una metodología que busca combinar el concepto de disponibilidad natural y gerencial con el método de metafrontera no cóncava para determinar la medición unificada de eficiencia de 251 termoeléctricas. Los resultados determinan, que, debido a la tecnología avanzada de las centrales eléctricas de carbón, se da mayor eficiencia unificada en términos de disponibilidad natural y administrativa, cuya eficiencia está condicionada por la ubicación geográfica.

Sueyoshi et al., 2020, proponen tres enfoques intermedios para evaluar la eficiencia estos son el enfoque transversal, análisis de eficiencia de ventana y enfoque de índice de ventana, posteriormente hacen una comparación estadística. Examinan un sesgo metrológico existente en el estudio, como es la política energética y el clima. Los enfoques propuestos se aplican para medir la eficiencia unificada de los combustibles fósiles centrales eléctricas a nivel provincial en China de 2007 a 2017, ya que estas plantas son importantes consumidores y emisores de CO₂. Como resultado se tiene,

que las implicaciones importantes que se dan son: Diferencias considerables entre los tres enfoques, lo que implica la existencia del sesgo metodológico, que depende en gran medida de las políticas gubernamentales.

Otro trabajo de gran relevancia para este estudio, es el expuesto por Fichera et al., 2020, quienes brindan una metodología basada en las normas internacionales ISO 50001 e ISO 50006, las cuales se pueden transferir fácilmente a las organizaciones, lo que genera consistencia en productos tangibles. Sin embargo, es igualmente importante construir un sistema de gestión de energía adaptado a organizaciones públicas, cuyos productos son a menudo bienes inmateriales y en los que los edificios afectan en gran medida los rendimientos energéticos. Comúnmente, el rendimiento energético de los edificios se evalúa comparándolo con el punto de referencia, mientras que las prácticas de seguimiento y control a menudo se pasan por alto. Bajo estas premisas, los autores proponen un marco común para un sistema de gestión de la energía adaptado a las organizaciones públicas en el que los edificios desempeñan un papel fundamental en la mejora del rendimiento energético. La gestión energética propuesta se basa en la explotación eficaz de las herramientas de seguimiento y control para identificar rápidamente las desviaciones a partir de los valores de rendimiento energético esperados y evaluar las mejoras a lo largo del tiempo.

Cabello Eras et al., 2020. Estos autores desarrollan como metodología un enfoque para evaluar el rendimiento energético de los sistemas de aire comprimido basado en una energía local de seis pasos:

1. Estratificación del uso de AC: identificar las secciones con uso significativo de AC.

2. Adquisición de datos: medir la producción de AC y su uso.
3. Auditoría energética: revisión detallada del uso de CA en cada sección para identificar medidas de ahorro y actualizar el EP del CAS.
4. Benchmarking: uso de los datos medidos en las secciones con demanda significativa de AC durante un período, para correlacionar la producción y la demanda de AC en cada caso y desarrollar IDE adecuados y EnBs.
5. Implementación y evaluación: implemente las medidas de ahorro identificadas en el paso 3 y evalúe los resultados utilizando el EnB.
6. Procedimiento de gestión energética (EMP). Se desarrolla e implementa un procedimiento para evaluar sistemáticamente la electricidad eficiencia del CAS.

Los autores Ocampo Batlle et al., 2020, quienes aplican una metodología que no está basada en un indicador absoluto de consumo de energía, sino que se basa en un desempeño de referencia establecido para condiciones similares de tiempo, factores climáticos, tipo de instalación, y así sucesivamente. Esta metodología puede vincular indicadores de alto y bajo nivel para obtener un marco integral del desempeño energético, lo que ayuda a comprender qué se debe hacer para mejorarlo y dónde se deben realizar más análisis.

Jindal & Nilakantan, 2021, proponen evaluar la eficiencia técnica de las centrales eléctricas utilizando el modelo de medida basada en Slacks, indicando un margen sustancial para mejorar la eficiencia. Como metodología, se basan en el enfoque de regresión truncada bootstrapped de Simar y Wilson para analizar el determinante de la eficiencia técnica. Encontramos que existe una relación en forma de U invertida entre eficiencia y edad de la planta, con niveles máximos de eficiencia observados

entre los 22 y 23 años. Como resultado determinan, que las plantas grandes son más eficientes que las pequeñas y plantas de tamaño mediano. La calidad del carbón no tiene una influencia significativa en la eficiencia ya que el uso de un poder calorífico superior no va acompañado de una reducción concomitante en el uso de carbón. Las plantas equipadas en el extranjero operan con mayor eficiencia niveles de eficiencia que las plantas equipadas de la India.

Autores como Jin et al., 2021, presentan un Modelo de Madurez de Gestión de la Energía altamente basado en la práctica para China (EMMM-China), con la intención de hacer contribuciones dobles a este dominio. Para la perspectiva metodológica y determinar los resultados, este estudio ha demostrado un conjunto de estrategias recomendables para formular acertadamente las métricas de un modelo, que abarcan tanto las imperfecciones de los ME como las buenas prácticas.

Cada uno de los trabajos expuestos, le aportan a nuestro trabajo una metodología que es clave como evaluación de la eficiencia energética, de acuerdo a la en ISO 50001. La literatura descrita, describe como la eficiencia energética se ha convertido en una prioridad en las agendas de los gobiernos de todo el mundo, debido a que las fuentes energéticas tradicionales tienen un carácter limitado, son cada vez más caras, generan una dependencia del mercado exterior y, además, tienen un impacto relevante sobre el medioambiente y el ecosistema. A nivel productivo, las empresas y las diferentes administraciones públicas están poniendo en marcha un número cada vez mayor de medidas e iniciativas para apostar por las energías provenientes de las fuentes renovables y por la sostenibilidad, de tal manera que sirvan como guía de ahorro energético y, por ende, contribuyan a que el planeta sea más sostenible.

5. METODOLOGÍA

Con el fin de realizar la evaluación energética a las centrales termoeléctricas a gas de Colombia, se siguen las pautas establecidas en la norma ISO 50001 y ISO 50006 (ISO 50001, 2018; ISO 50006, 2014), En la figura 5 se muestra un diagrama de flujo de cómo se realiza la evaluación energética en este estudio siguiendo estas pautas.

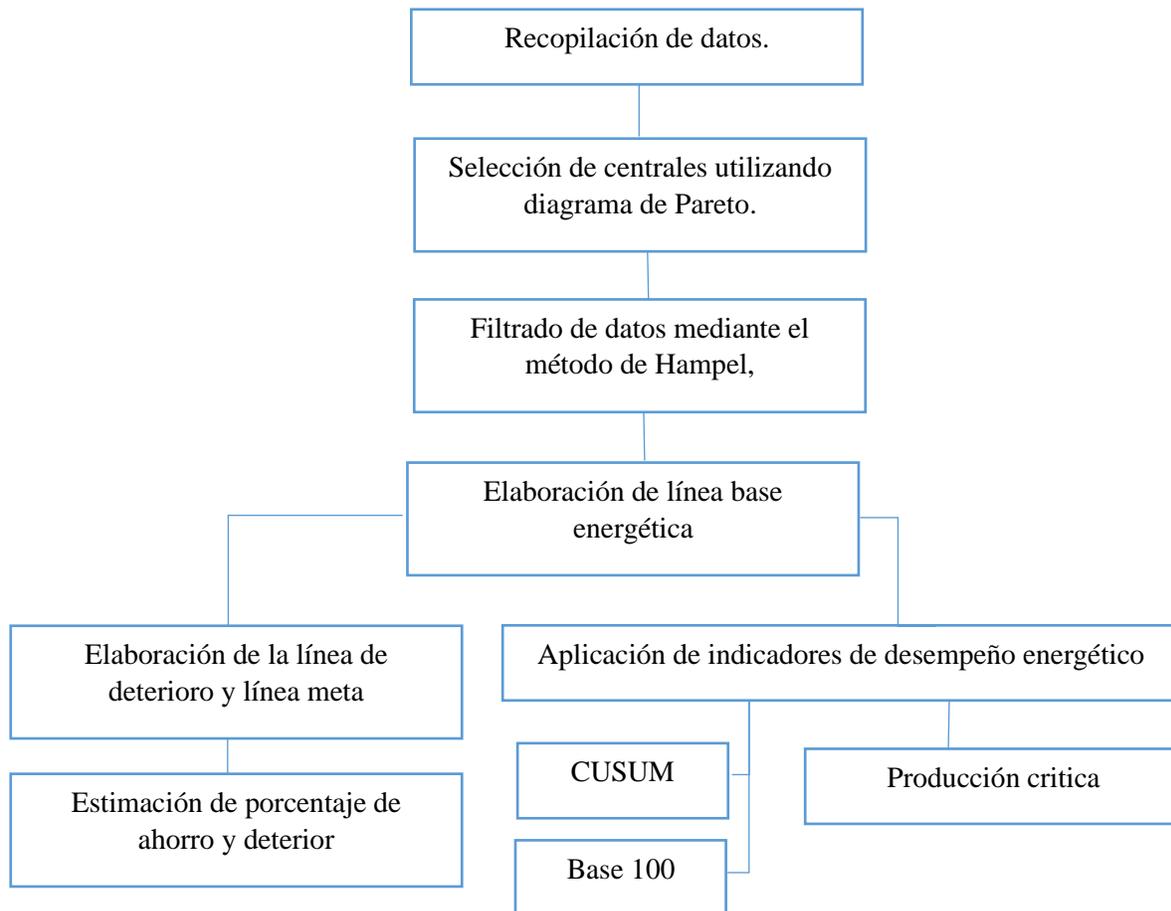


Figura 5. Diagrama de flujo de la metodología empleada (Elaborado por los autores).

Inicialmente, se establece un periodo de tiempo, para el cual se calcula la línea base de energía (LBE), este debe comprender tiempo mínimo de 12 meses según la ISO 50006, la evaluación energética se realizó a los 3 últimos años, es decir 2018, 2019 y 2020, con la finalidad de mostrar la evolución de los sistema de gestión eléctrica y las herramientas de control a lo largo de estos años (Eras et al., 2019).

Para establecer cuáles centrales se tomarán como objetivo de la evaluación, se aplicó el principio de Pareto (regla 80/20) (Sagastume Gutiérrez et al., 2018), para mostrar cómo se relaciona el consumo de gas en cada una de las centrales termoeléctricas, con el consumo de gas acumulado en porcentaje de todas las termoeléctricas en Colombia, con el objetivo de mostrar cuáles de estas tienen mayor efecto en el consumo global.

La variable a utilizar en el cálculo de la LBE, dado que puede afectar el comportamiento de esta, es la zona donde se encuentra ubicada la termoeléctrica según (Xie et al., 2019), por la diferencia en los grados de temperatura entre las diferentes zonas del país. Dado que se da por sentado que todas las termoeléctricas siguen prácticas estandarizadas se espera que el coeficiente de correlación (R) de los datos de estas sea alto y no se encuentre condicionado por la temperatura exterior. En caso de obtener un R bajo se procederá a normalizar esta variable.

Para evaluar el consumo de gas natural para la generación de energía eléctrica en las termoeléctricas de Colombia siguiendo la familia de normas ISO 50000, es necesario conocer los datos de consumo y generación respectivamente. Los datos de consumo de combustible se obtuvieron del sistema de información eléctrico colombiano (SIEL, 2021) estos se presentan como un informe anual desglosado por meses que muestra el consumo de gas para cada una de las centrales termoeléctricas. Los datos de generación eléctrica en este subsector industrial se obtienen del balance energético nacional tal como recomienda la International Energy Agency, 2016, estos datos son emitidos por el despacho térmico de XM Compañía Expertos en Mercados S.A. E.S.P., son presentados en informes de diarios, desglosados por hora para cada una de las centrales que participan en el despacho energético por razones de seguridad,

calidad o confiabilidad, pruebas autorizadas, característica técnica, rampas de salida, rampas de entrada, demanda internacional y despachada por otras causas. En este estudio se excluyeron los datos de generación eléctrica provenientes de pruebas no autorizadas y pruebas de disponibilidad.

Es importante recalcar que se eligen los reportes diarios mencionados anteriormente sobre los reportes mensuales dados por el sistema de información eléctrico colombiano (SIEL), dado que en estos reportes las termoeléctricas están agrupadas por agente de generación eléctrica, lo cual impide un análisis más detallado de ya sea por ciclo de generación utilizado o los presentados en estudios anteriores (Fan et al., 2020; Jindal & Nilakantan, 2021; Sueyoshi et al., 2020; Xie et al., 2019).

Luego de seleccionar los datos se procede a la elaboración de gráficos de correlación con la ayuda del software de Statgraphics Technologies, 2020, se realizó este proceso para un periodo de tres años para cada una de las termoeléctricas seleccionadas mediante el criterio de Pareto. Con el fin de examinar a cada una de estas centrales como áreas con demanda relevante de energía y así detectar ineficiencias significativas (Sagastume Gutiérrez et al., 2018), dado que es necesario evaluar de forma individual para evidenciar si existen posibilidades de disminuir el consumo de gas mantenido la misma producción de energía eléctrica mediante los métodos planteados en la norma ISO 50006.

Del gráfico de correlación de cada termoeléctrica se obtuvieron ecuaciones de línea de tendencia, mediante las cuales se estimó el consumo de gas en función de la generación de energía para cada una de las centrales de mayor consumo de combustible, utilizando la diferencia del consumo real con el consumo estimado se

procedió a elaborar una tabla de datos, con el fin de calcular la Desviación Mediana Absoluta (MAD), que es una medida robusta de la variabilidad de una muestra univariante de datos cuantitativos (Hampel, 1974). Este proceso se realiza para la detección y eliminación de valores atípicos o OUTLIERS, con la finalidad de filtrar los datos y así aumentar el valor del coeficiente de determinación (R^2).

Con los datos ya filtrados se pasó a elaborar la LBE para cada termoeléctrica de esta grafica se verifico el R^2 , este valor es una medida general que expresa qué tan bien se ajustan los datos a la línea de regresión, Este coeficiente se expresa como un porcentaje del 0% al 100%; en general, cuanto más alto mejor se ajusta al modelo a los datos (Fichera et al., 2020). La ISO 50006 recomienda valores de R^2 más alto que 0.78 con el fin de confirmar efectivamente la significancia de la relación entre las variables relevantes elegidas y los indicadores de desempeño energético IDE.

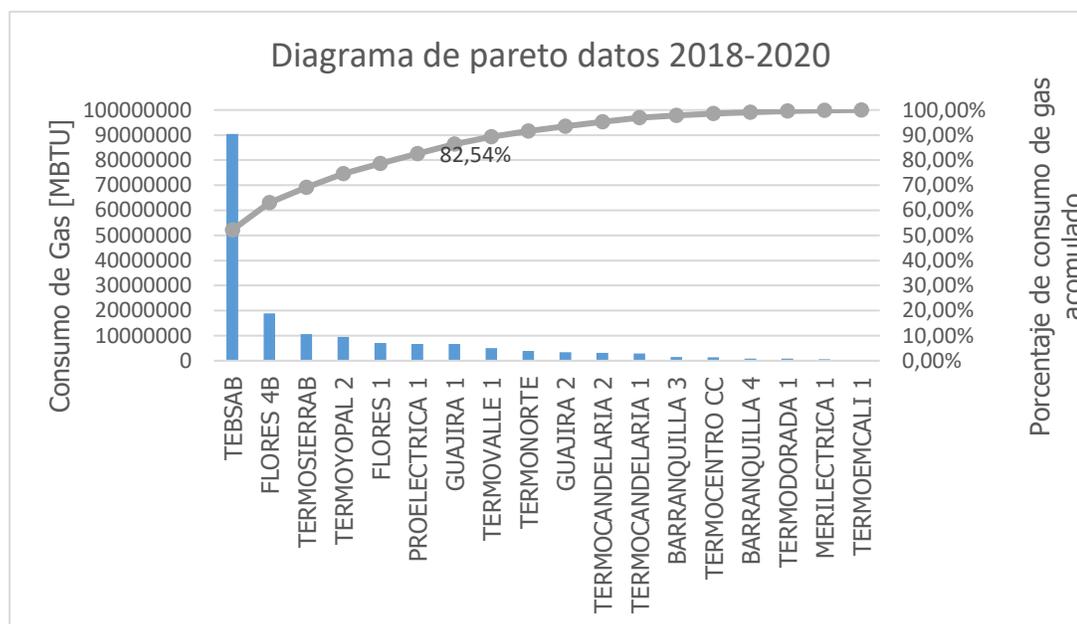
El modelo estadístico para la normalización de la línea base energética fue un modelo Univariable (ecuación 1), donde el consumo de energía E está dando, por un índice de consumo de transformación de la materia prima denominado m , multiplicado por la cantidad de generación o producto transformado llamado P , sumado a E_0 que corresponde al valor medio de la energía no asociada a la producción, esta es la energía necesaria para mantener el proceso de producción (ISO 50006, 2014).

$$E = m \times P + E_0 \text{ Ec (1).}$$

Por medio de la ecuación dada por la LBE se procede a calcular y graficar la línea meta y la de deterioro. En este estudio se aplicaron indicadores de desempeño energético IDE estos son el indicador de producción critica, el indicador de base 100 y el indicador de tendencia del desempeño Energético.

6. RESULTADOS

La grafica 1 se construyó a partir de todos datos de consumo de gas recopilados de los últimos tres años de todas las centrales termoeléctricas a gas natural de Colombia, estos datos se muestran en la tabla 1 del anexo.



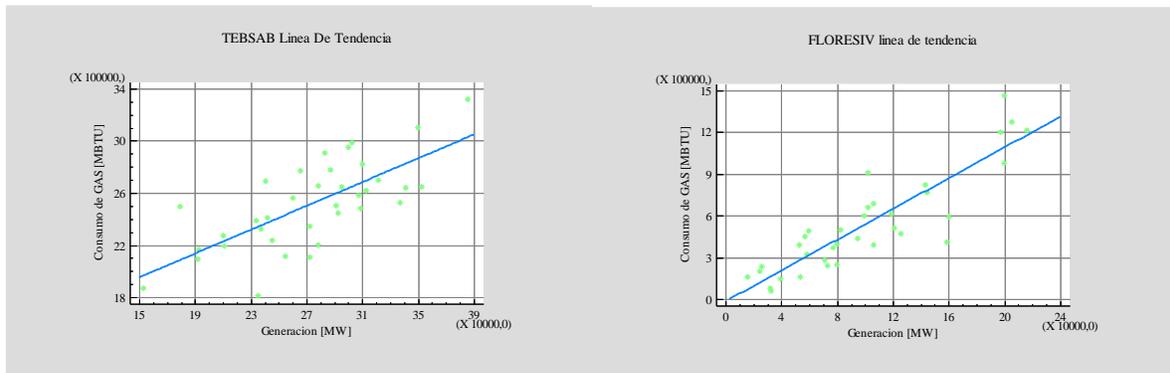
Grafica 1. Diagrama de Pareto para el consumo de gas en las termoeléctricas colombianas.

En el gráfico anterior se observa que el 82,54% del consumo de gas en los últimos tres años se concentró en las termoeléctricas Tebsab, Flores 4B, Termosierab, Termoyopal 2, Flores 1 y Proelectrica 1, por tanto, estas centrales son la prioridad del estudio. En la tabla 1 se muestra el porcentaje de consumo de gas acumulado, el agente propietario, ubicación geográfica y capacidad neta instalada de cada central, esta información es utilizada para realizar posteriores comparaciones entre centrales.

Tabla 1. *Características centrales seleccionadas (andeg, 2021), edición editor.*

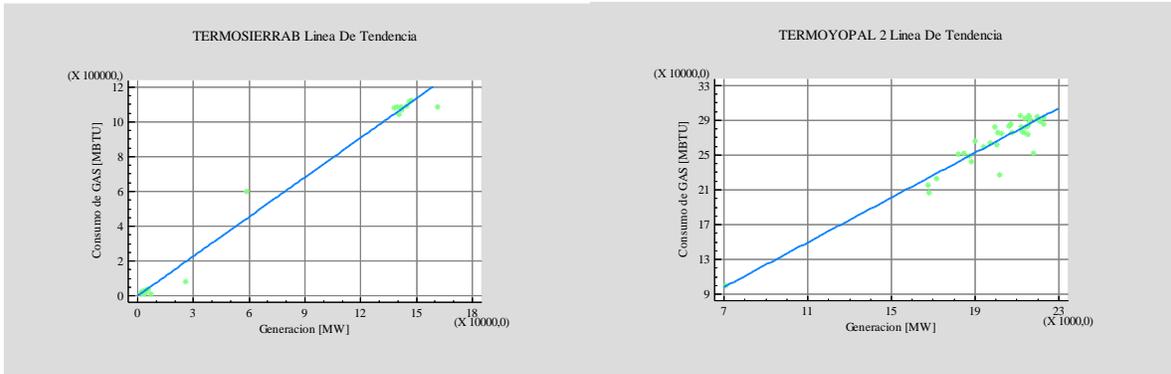
Agente propietario	Central	Ubicación	Capacidad [Mw]	Tecnología	Año de operación	Consumo de gas
TERMOBARRANQUILL A S.A. E.S.P.	Tebsab	Atlántico	918	Ciclo combinado	1992	51,82%
PRIME TERMOFLORES S.A E.S.P.	Flores 4B	Atlántico	450	Ciclo combinado	2011	10,82%
EMPRESAS PUBLICAS DE MEDELLIN E.S.P	Termosierrab	Antioquia	353	Ciclo combinado	1998	6,11%
TERMOYOPAL GENERACION 2 S.A.S E.S.P.	Termoyopal 2	Casanare	30	Ciclo Abierto	2004	5,46%
PRIME TERMOFLORES S.A E.S.P.	Flores 1	Atlántico	160	ciclo combinado	1993	4,58%
PROELECTRICA S.A.S E.S.P.	Proelectrica	Bolívar	90	Ciclo STIG	90	3,84%

Los datos de consumo y generación de energía eléctrica de estas termoeléctricas se muestran en las tablas 12-17 del anexo, para cada una de estas tablas se elaboró su respectivo diagrama de dispersión con el fin de obtener una línea de tendencia, las gráficas resultantes se muestran en las figuras 2-7, las ecuaciones del modelo ajustado se registran en la tabla 2 junto con el valor del R^2 . A partir de las ecuaciones esas ecuaciones se pasa a evaluar individualmente el consumo de gas para la generación de energía eléctrica en estas centrales termoeléctricas colombianas.



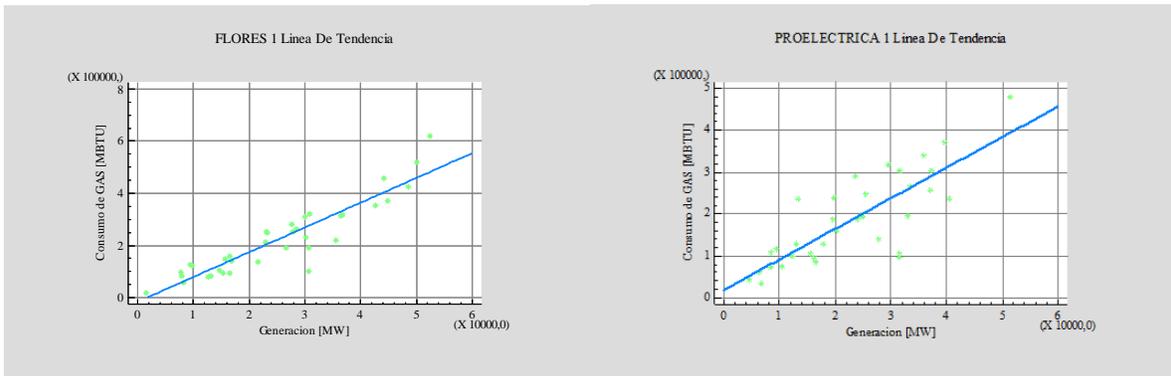
Grafica 2. Línea de tendencia Tebsab

Grafica 3. Línea de tendencia Flores IV



Grafica 4. Línea de tendencia Termosierrab

Grafica 5. Línea de tendencia Termoyopal



Grafica 6. Línea de tendencia Flores 1

Grafica 7 Línea de tendencia Proelectrica 1

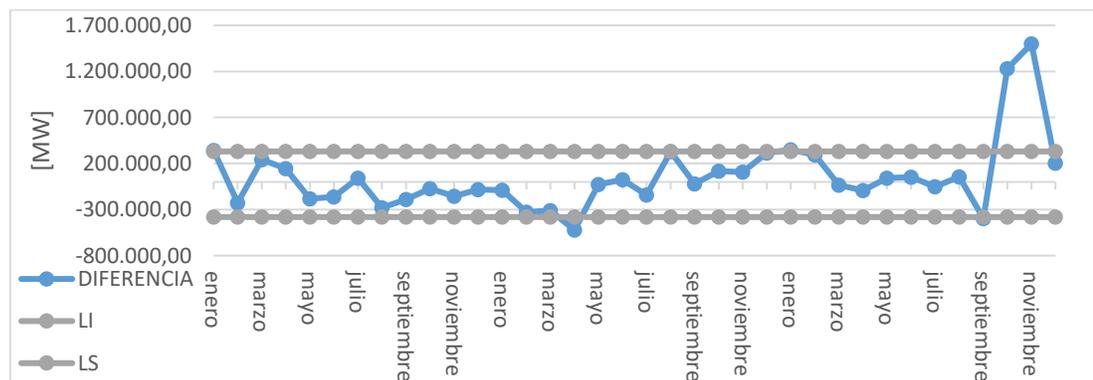
Tabla 2. Ecuaciones de línea de tendencia y R^2 para las centrales termoeléctricas.

Central	Ecuación de línea de tendencia	R^2
Tebsab	$Consumo\ de\ GAS\ [MBTU] = 1,26975E6 + 4,55684 \times Generacion\ [MW]$	51,50
Flores 4B	$Consumo\ de\ GAS\ [MBTU] = -14987,6 + 5,52328 \times Generacion\ [MW]$	78,24
Termosierrab	$Consumo\ de\ GAS\ [MBTU] = -3543,72 + 7,56236 \times Generacion\ [MW]$	98,57
Termoyopal 2	$Consumo\ de\ GAS\ [MBTU] = 7382,77 + 12,8588 \times Generacion\ [MW]$	89,12
Flores 1	$Consumo\ de\ GAS\ [MBTU] = -17910,7 + 9,48687 \times Generación\ [MW]$	84,30
Proelectrica	$Consumo\ de\ GAS\ [MBTU] = 18850,5 + 7,30119 \times Generación\ [MW]$	65,85

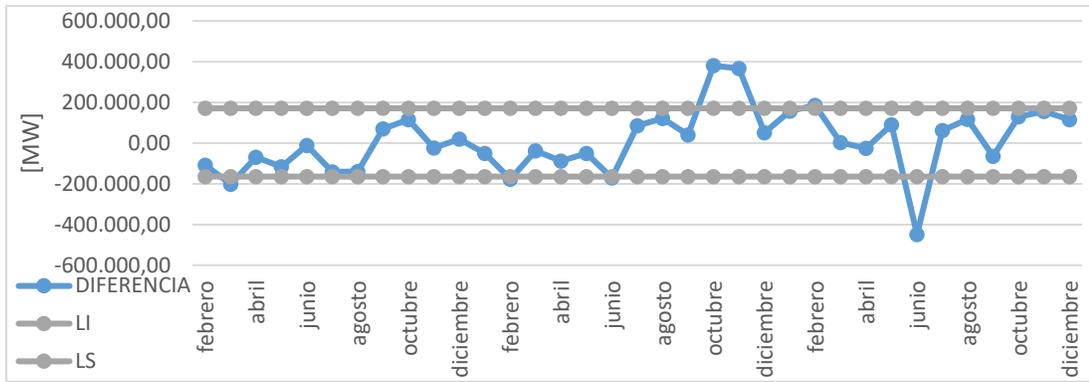
El resultado mostrado por la tabla 2 indica que el índice de determinación R^2 es menor para TEBSAB, con un valor de 51,5%, por lo cual estos datos tienen una relación moderada entre ellos, igualmente para la central PROELECTRICA $R^2 = 65,85\%$. Las centrales FLORES IV, TERMO SIERRAB, TERMOYOPAL 2 y

FLORES 1 poseen índices de correlación fuerte $R > 75\%$, en el caso de TERMOSIERRAB la relación está cercana al 100%, es decir perfecta.

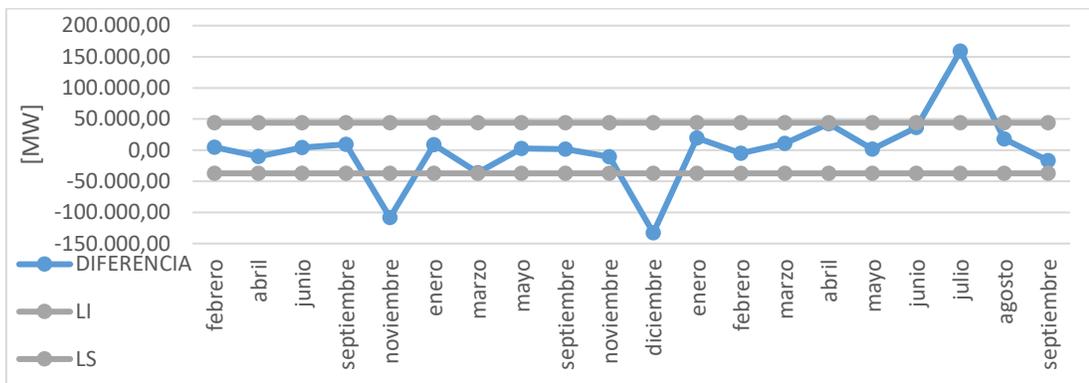
Con la finalidad de aumentar el índice de correlación, los datos de generación eléctrica y consumo de gas se filtraron, este proceso se muestra en las tablas 12-17 del anexo, mediante las ecuaciones expuestas en la tabla 2 se estima el consumo de gas en función de la generación eléctrica, se realizó la diferencia entre este consumo y el real, con este valor se aplica el método de Hampel para filtrar datos atípicos, mediante este método se busca filtrar un 20% del total de los datos de cada caso. Para que la Desviación Mediana Absoluta MAD sea un estimador consistente de la desviación estándar se debe multiplicar por un factor de escala constante k , que se varió en cada central para así no eliminar una cantidad mayor de datos a la deseada, los valores de k usados se muestran en cada tabla. Los valores que se clasificaron de datos atípicos mediante este método se resaltaron de color amarillo para su identificación, en las gráficas 7-12 se muestran los grafios resultantes de este proceso de filtrado.



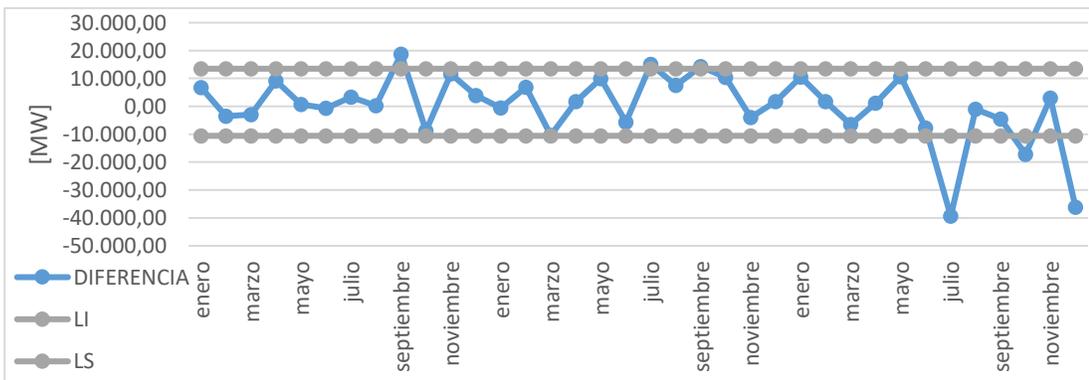
Gráfica 8. Filtrado de datos Tebsab.



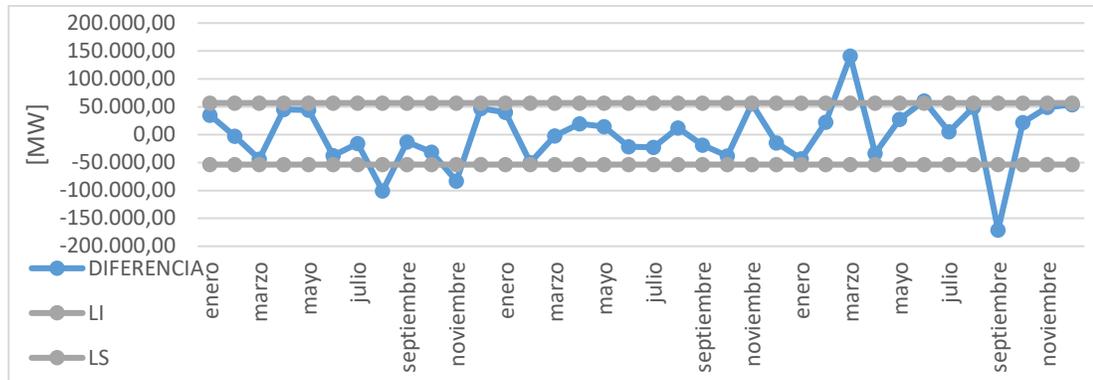
Grafica 9. Filtrado de datos Flores IV.



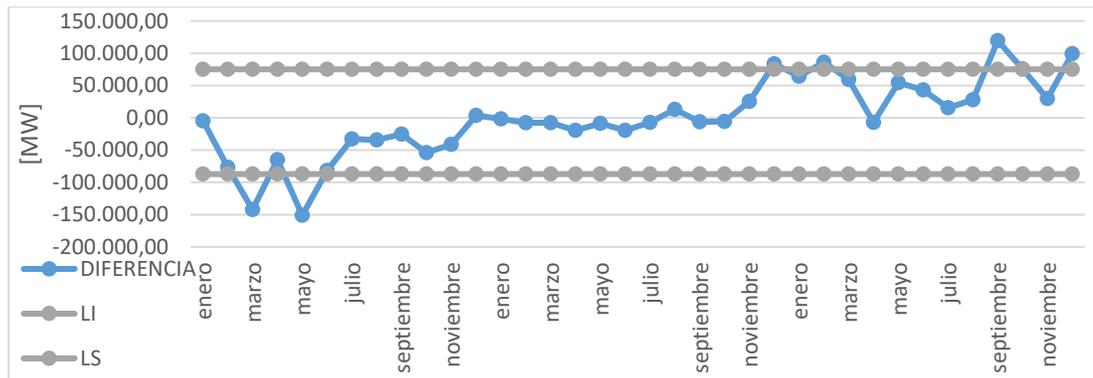
Grafica 10. Filtrado de datos Termosierrab.



Grafica 11. Filtrado de datos Termoyopal 2.



Grafica 12. Filtrado de datos Flores 1.

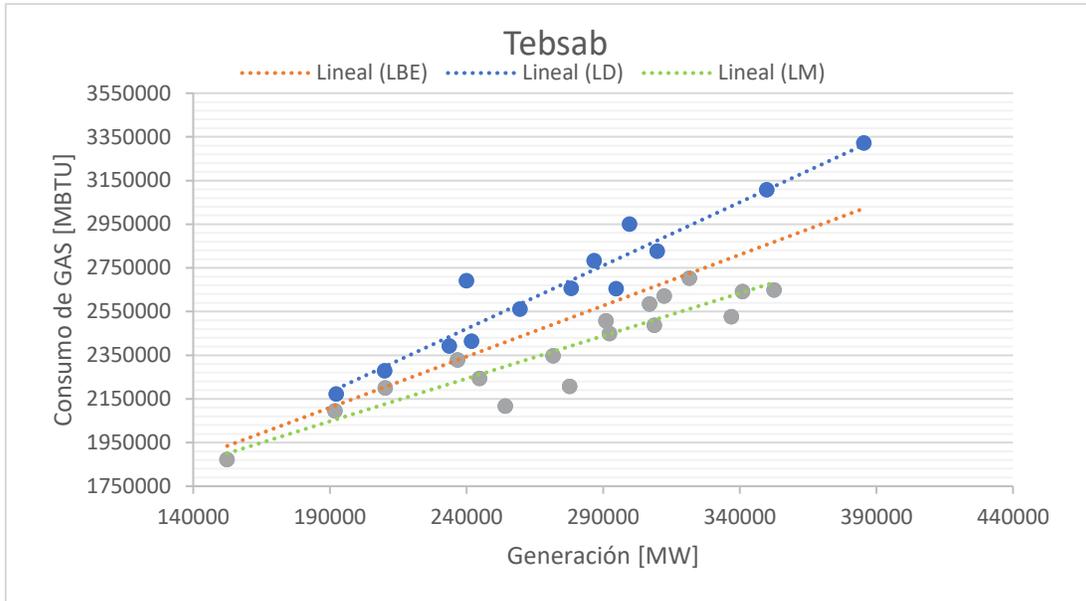


+Grafica 13. Filtrado de datos Proelectrica.

Con los datos filtrados para cada central termoeléctrica se procedió a elaborar la LBE, con la ecuación resultante de este grafico se elaboraron las gráficas de la línea meta (LM) y línea de deterioro (LD) las gráficas 14-19 muestran estos resultados. las ecuaciones dadas por cada uno de estos gráficos se muestran en las tablas 3-8 junto con el valor de R^2 de cada caso, los valores R^2 mayores 60,0% indican una relación potencial entre los datos, valores entre 75% a 100% indican la existencia de una relación fuerte entre los datos.

Tabla 3. Ecuaciones lineales y R^2 para Tebsab.

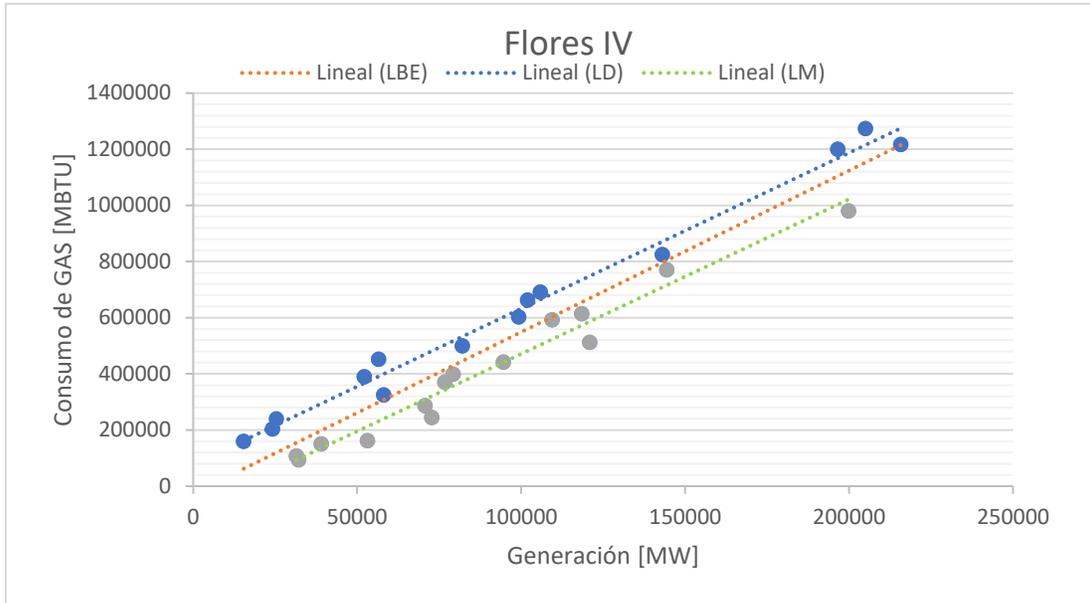
Tebsab	Ecuación	R^2
Línea Base	$\text{Consumo de GAS [MBTU]} = 1,22287E6 + 4,66868 \times \text{Generación [MW]}$	66,0
Línea Meta	$\text{Consumo de GAS [MBTU]} = 1,30398E6 + 3,91222 \times \text{Generación [MW]}$	84,82
Línea Deterioro	$\text{Consumo de GAS [MBTU]} = 1,08079E6 + 5,79263 \times \text{Generación [MW]}$	92,4



Grafica 14. Línea Base, meta y de deterioro para Tebsab.

Tabla 4. Ecuaciones lineales y R^2 para Flores IV.

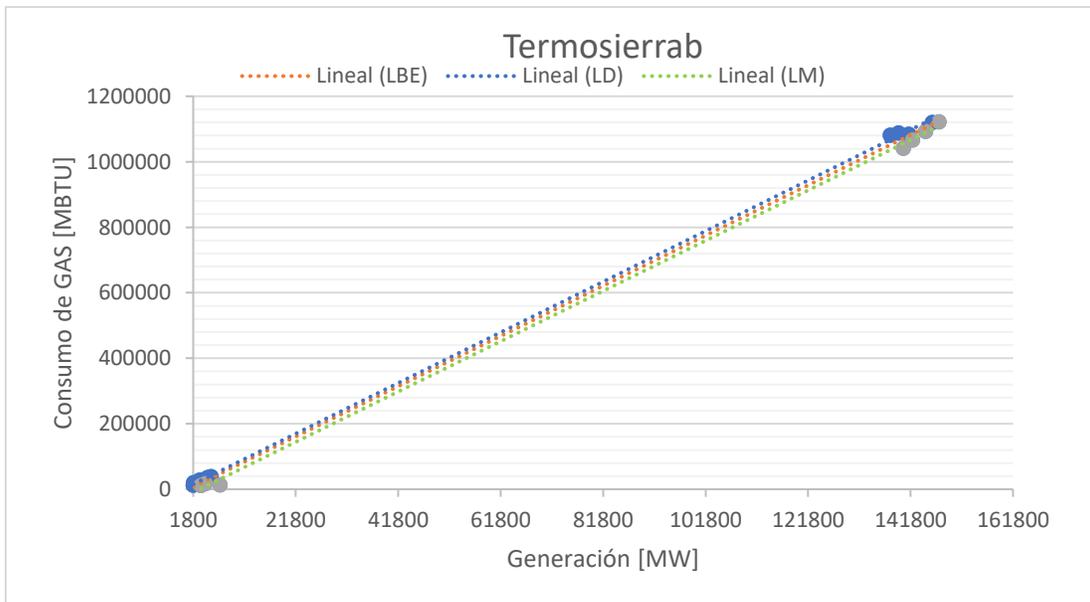
Flores IV	Ecuación	R^2
Línea Base	$\text{Consumo de GAS [MBTU]} = -19566,6 + 5,7027 \times \text{Generación [MW]}$	92,3
Línea Meta	$\text{Consumo de GAS [MBTU]} = -94879,2 + 5,62986 \times \text{Generación [MW]}$	96,9
Línea Deterioro	$\text{Consumo de GAS [MBTU]} = 77268 + 5,55018 \times \text{Generación [MW]}$	98,7



Grafica 15. Línea Base, meta y de deterioro para Flores IV.

Tabla 5. Ecuaciones lineales y R2 para Termosierrab.

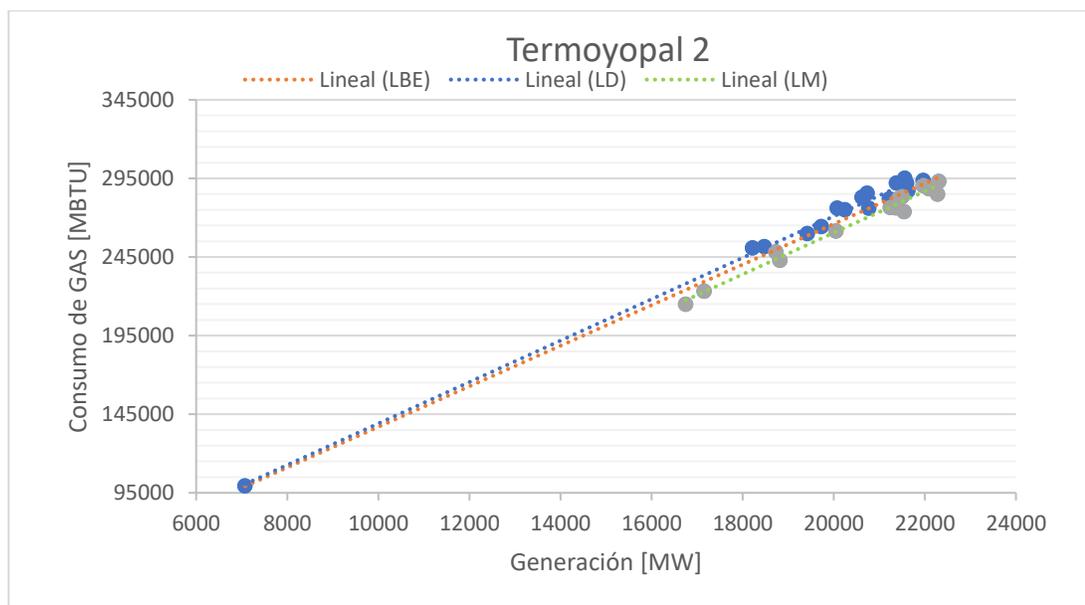
Termosierrab	Ecuación	R ²
Línea Base	$Consumo\ de\ GAS\ [MBTU] = -6557,55 + 7,67576 \times Generacion\ [MW]$	99,9
Línea Meta	$Consumo\ de\ GAS\ [MBTU] = -23058,3 + 7,7173 \times Generacion\ [MW]$	99,9
Línea Deterioro	$Consumo\ de\ GAS\ [MBTU] = 1204,44 + 7,7332 \times Generacion\ [MW]$	99,9



Grafica 16. Línea Base, meta y de deterioro para Termosierrab.

Tabla 6. Ecuaciones lineales y R2 para Termoyopal 2.

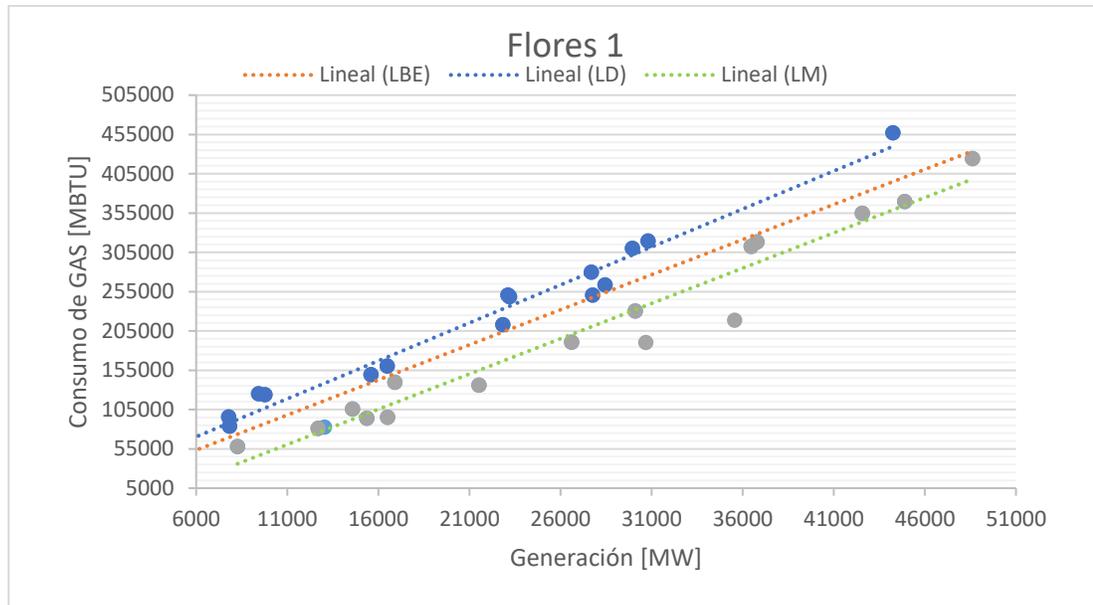
Termoyopal 2	Ecuación	R ²
Línea Base	$\text{Consumo de GAS [MBTU]} = 7829,83 + 12,9106 \times \text{Generacion [MW]}$	97,1
Línea Meta	$\text{consumo de GAS [MBTU]} = -3764,38 + 13,2094 \times \text{Generacion [MW]}$	98,9
Línea Deterioro	$\text{Consumo de GAS [MBTU]} = 7290,91 + 13,1811 \times \text{Generacion [MW]}$	99,3



Grafica 17. Línea Base, meta y de deterioro para Termoyopal 2.

Tabla 7 . Ecuaciones lineales y R2 para Flores 1.

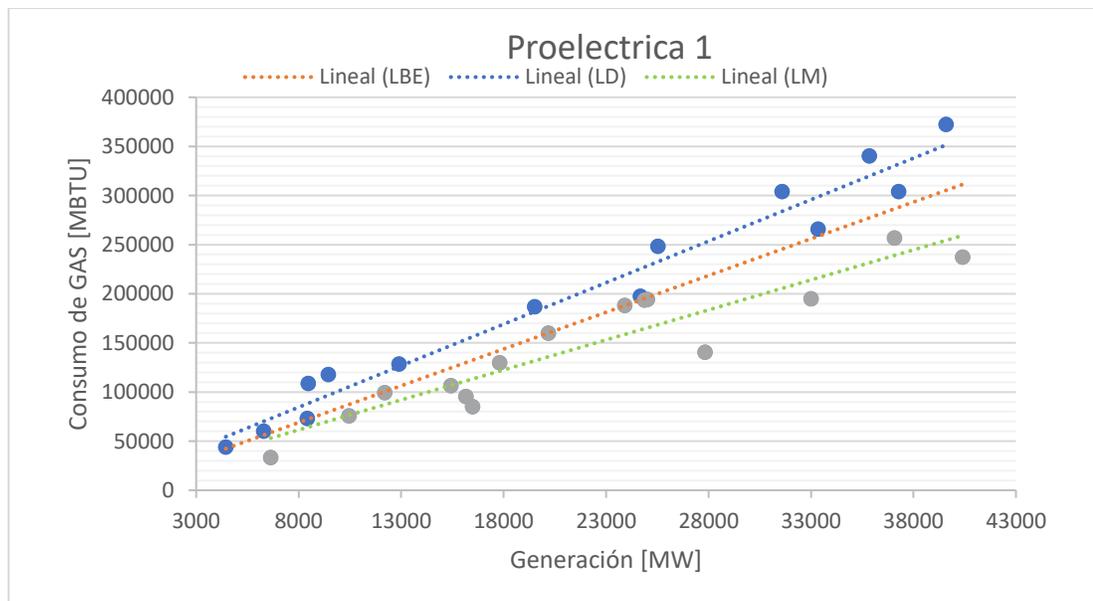
Flores 1	Ecuación	R ²
Línea Base	$\text{Consumo de GAS [MBTU]} = -155,808 + 8,92847 \times \text{Generacion [MW]}$	91,6
Línea Meta	$\text{Consumo de GAS [MBTU]} = -38228,7 + 8,9758 \times \text{Generacion [MW]}$	94,5
Línea Deterioro	$\text{Consumo de GAS [MBTU]} = 12399,3 + 9,65997 \times \text{Generacion [MW]}$	97,8



Grafica 18. Línea Base, meta y de deterioro para Flores 1.

Tabla 8. Ecuaciones lineales y R2 para Proelectrica 1.

Proelectrica 1	Ecuación	R ²
Línea Base	$Consumo\ de\ GAS\ [MBTU] = 9112,47 + 7,48087 \times Generacion\ [MW]$	83,10
Línea Meta	$Consumo\ de\ GAS\ [MBTU] = 12589,4 + 6,10707 \times Generacion\ [MW]$	86,5
Línea Deterioro	$Consumo\ de\ GAS\ [MBTU] = 16943 + 8,44976 \times Generacion\ [MW]$	96,5



Grafica 19. Línea Base, meta y de deterioro para Proelectrica 1.

Con las ecuaciones de LBE, LM y LD se procedió a estimar el consumo de gas en función de la generación de energía para cada mes de los datos filtrados, los datos de consumo estimados se sumaron según la ecuación de donde se calcularon. El porcentaje de ahorro se calculó al dividir el total del consumo estimado con la ecuación LM entre el total de consumo estimado por medio de la LBE, de igual manera se procedió para el cálculo del porcentaje de deterioro, este procedimiento se muestra en las ecuaciones 2 y 3. Los resultados se muestran en la tabla 9.

$$\%ahorro = 1 - \frac{\sum LM_{Consumo\ de\ gas}}{\sum LBE_{Consumo\ de\ gas}} \quad Ec. (2)$$

$$\%De\ deterioro = 1 - \frac{\sum LM_{Consumo\ de\ gas}}{\sum LBE_{Consumo\ de\ gas}} \quad Ec. (3)$$

Tabla 9. Porcentajes de ahorro y de deterioro calculados para las centrales termoeléctricas.

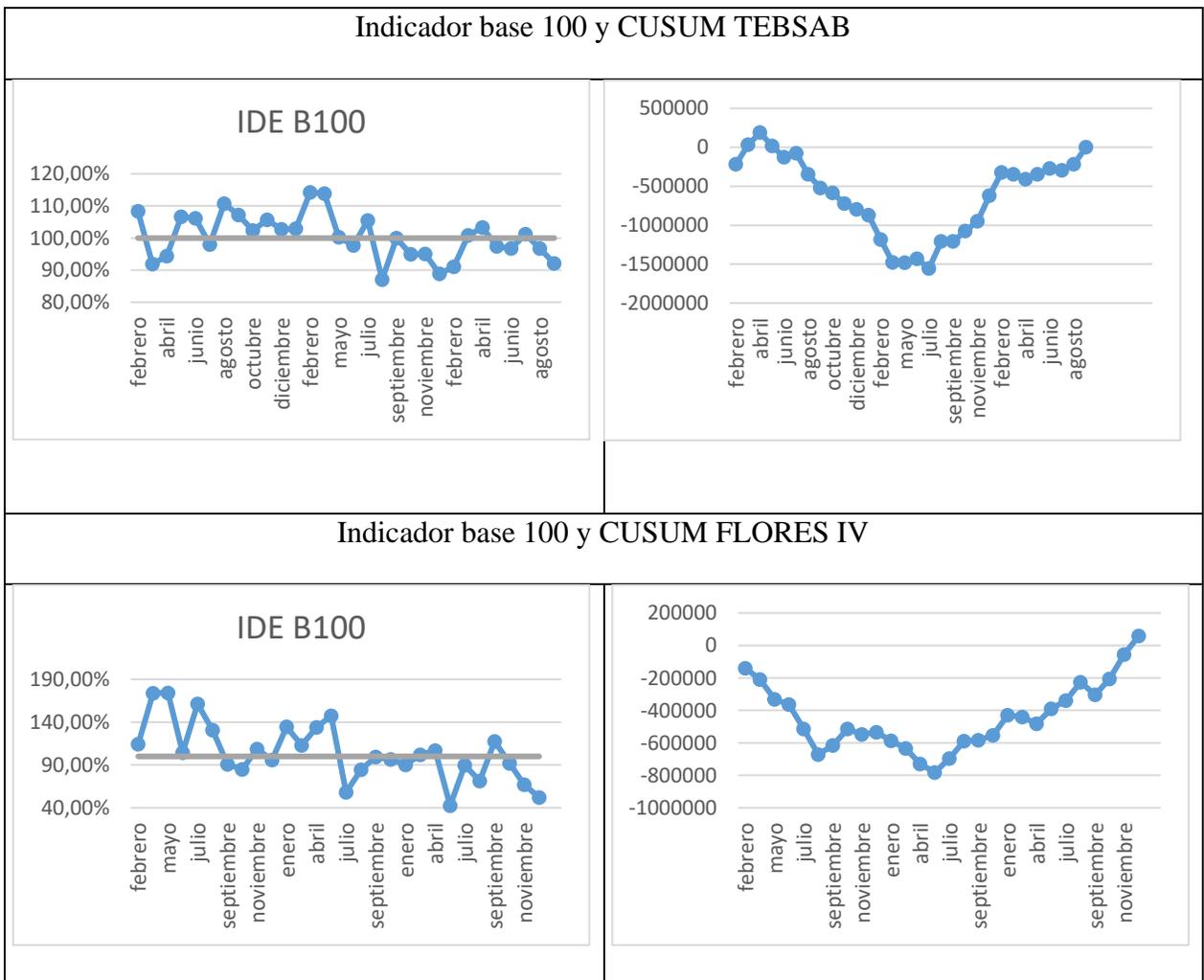
Central	% De Ahorro	% De Deterioro
Tebsab	5,09%	-6,70%
Flores 4B	15,95%	-16,02%
Termosierrab	3,12%	-2,48%
Termoyopal 2	2,10%	-1,83%
Flores 1	18,06%	-14,33%
Proelectrica	15,34%	-16,86%

El IDE Base 100 se calculó utilizando la ecuación 4, especificada por la (ISO 50006, 2014), donde ELB se refiere al consumo de un mes calculado por medio de la ecuación dada por la LBE, este valor se divide entre consumo real Er y se multiplica por 100, este procedimiento se realiza para todos los datos de las centrales objetivo y luego se graficaron los resultados. Estas graficas se muestran en el lado izquierdo de la tabla 10.

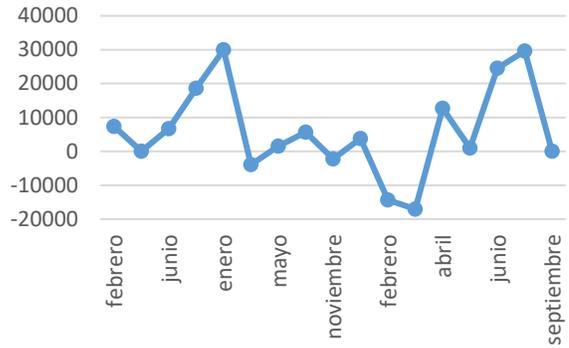
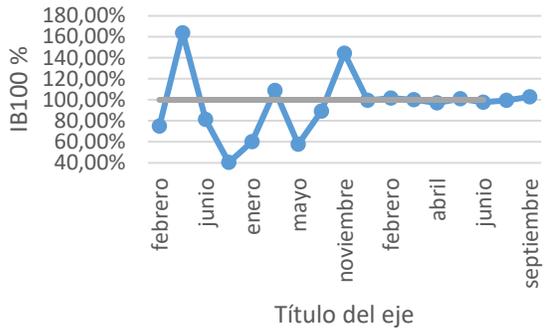
$$IB_{100} = \frac{ELB}{Er} \quad Ec. (4)$$

El grafico del indicador de tendencia del desempeño Energético CUSUM, se elaboró utilizando la ecuación 5, donde el primer término es la diferencia del consumo de gas real menos el calculado mediante la línea base energética para el periodo inicial sumado con el segundo término, que es el consumo de gas real menos el calculado mediante la línea base energética para el periodo anterior. Con los resultados obtenidos se realizaron las gráficas que se muestran en el lado derecho de la tabla 10.

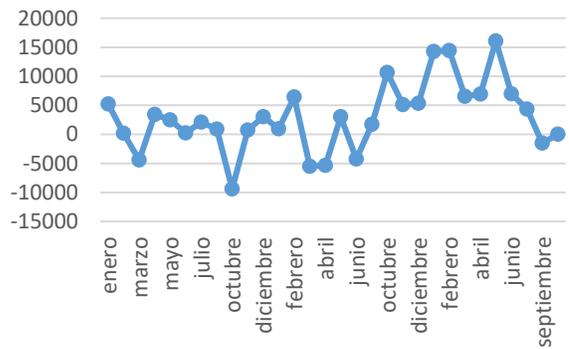
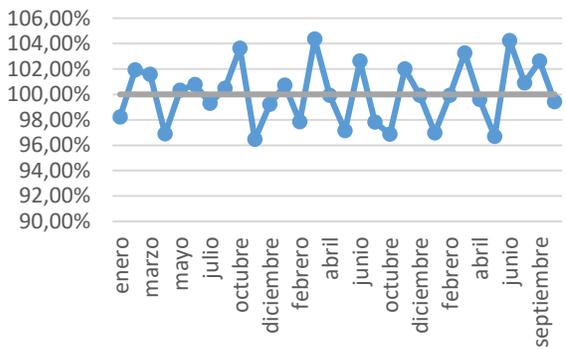
$$\text{Suma acumulativa} = (E_r - E_{LB})_i + (E_r - E_{LB})_{i-1} \text{ Ec. (5)}$$



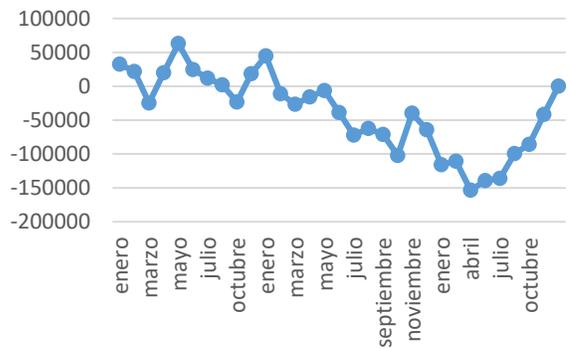
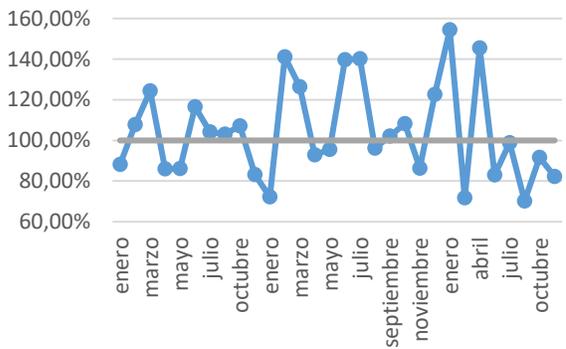
Indicador base 100 y CUSUM TERMO SIERRA B



Indicador base 100 y CUSUM TERMO YOPAL 2



Indicador base 100 y CUSUM FLORES 1



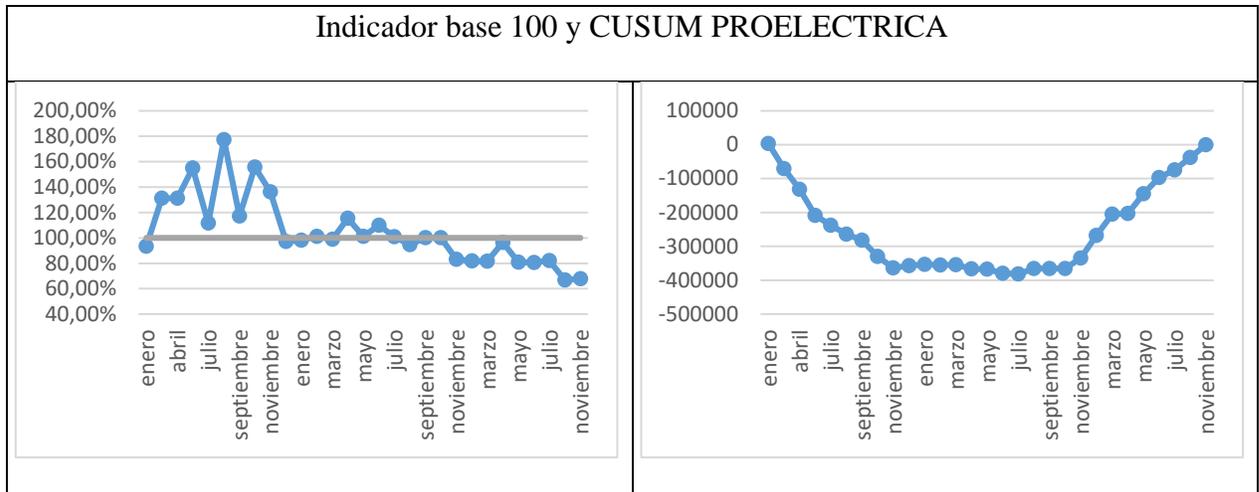


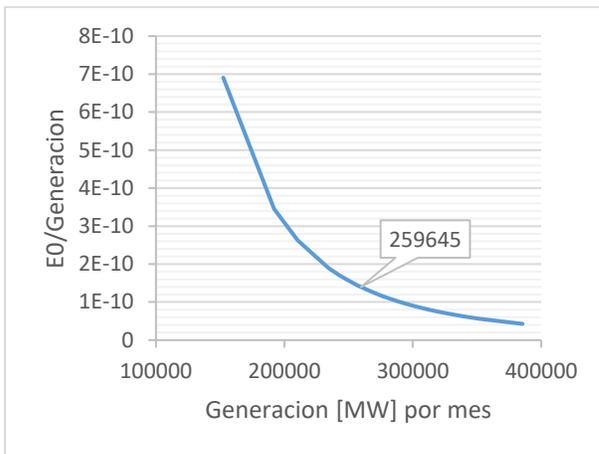
Tabla 10 . Gráfico indicador base 100 y CUSUM de izquierda a derecha, para las termoeléctricas evaluadas.

Los gráficos de producción crítica (PC) se elaboraron utilizando la derivada de la ecuación del Índice De Consumo teórico (ICt) ecuación 6, planteada por Campos, 2017. Donde E_0 es valor medio de la energía no asociada a la producción, m es el índice de consumo de transformación y P es la producción de energía para cada mes, estos datos son obtenidos de la LBE de cada central. Para algunas centrales se utilizó la segunda derivada de esta ecuación, con el fin de acentuar la pendiente de la gráfica y así observar claramente cuál es el valor de la PC. Se debe aclarar que la producción P esta en MW por mes, por lo cual el valor obtenido de PC fue dividido entre las horas que funciona la central termoeléctrica, este dato se obtiene de los informes por horas del despacho térmico de XM (Grupo ISA, 2021).

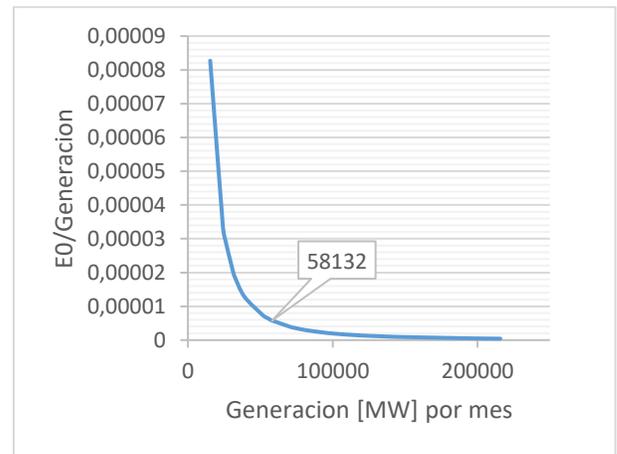
$$ICt = m + \frac{E_0}{P} \text{ Ec. (6)}$$

$$\frac{dICt}{dP} = -\frac{E_0}{P^2}$$

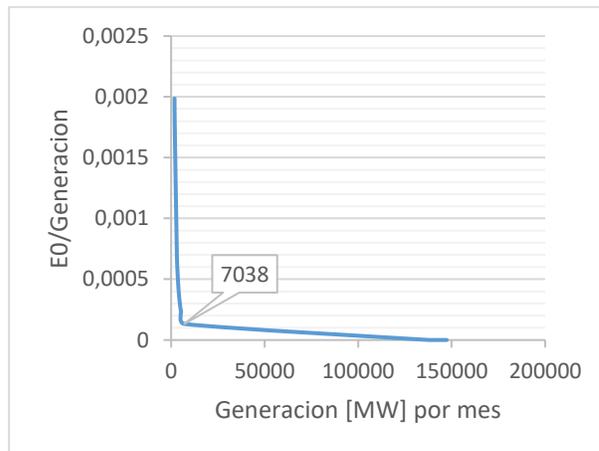
Con los datos resultantes de la ecuación 6 se construyeron los gráficos 20-25. Con los valores mostrados en la graficas anteriores y dividido entre las horas de trabajo correspondientes se elaboró la tabla 11. Donde se muestra la PC para las centrales seleccionadas mediante el criterio de Pareto y se adicionan otras centrales, las cuales tuvieron consumo de gas mayor al 1%, en el periodo de tiempo del estudio. Esta tabla se dividió en tres columnas, cada una agrupa valores de generación critica menores a 40 MW, entre 40MW -100MW, y mayores a 100 MW.



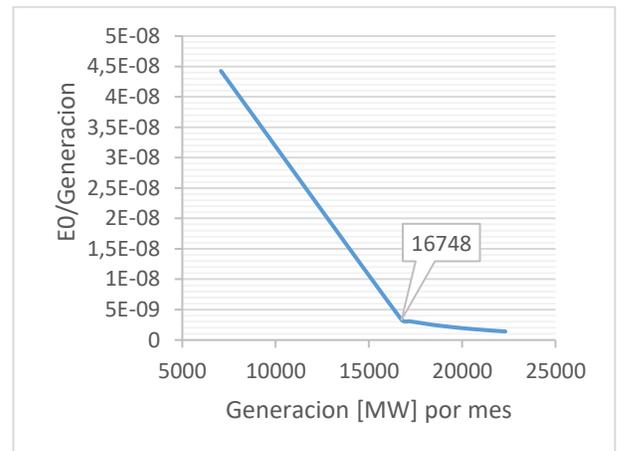
Gráfica 20. Producción crítica Tebsab.



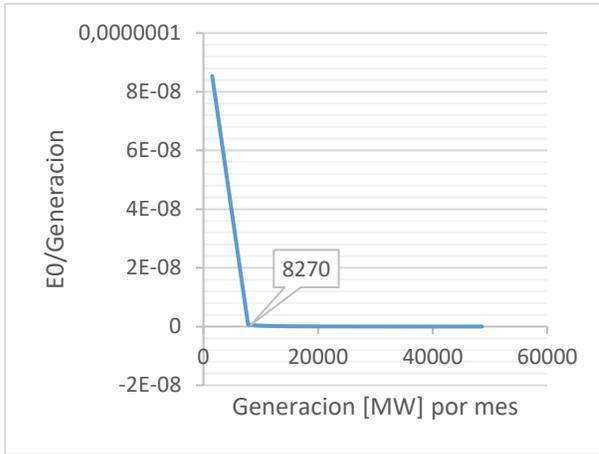
Gráfica 21. Producción crítica Flores IV.



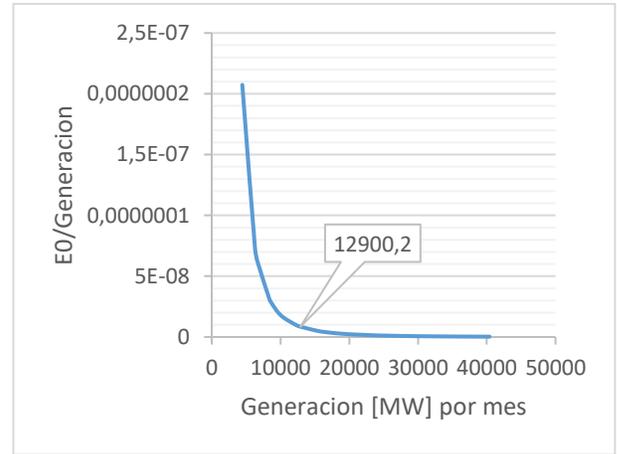
Gráfica 22. Producción crítica Termosierrab.



Gráfica 23. Producción crítica Termoyopal.



Grafica 24. Producción crítica Flores 1.



Grafica 25. Producción crítica Proelectrica 1

Generación crítica de energía [MW]		
PC < 40 [MW]	30 [MW] > PC < 100 [MW]	PC > 100 [MW]
TERMOYOPAL 2	TERMOCANDELARIA 1	TERMO SIERRAB
PC: 27,5	PC: 44,21	PC: 163,6
TERMONORTE	GUAJIRA 2	FLORES IV
PC: 29,8	PC: 45,24	PC: 178,31
PROELECTRICA 1	TERMOCANDELARIA 2	TEBSAB
PC: 33,94	PC: 49,77	PC: 334,6
GUAJIRA 1	FLORES 1	
PC: 38,1	PC: 56,6	
	TERMOVALLE 1	
	PC: 80,33	

Tabla 11 . Producción crítica para varias centrales termoeléctricas a gas en Colombia.

7. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Inicialmente los datos consultados para TEBSAB dieron como resultado un coeficiente de determinación moderado 51.50%, luego de filtrar los datos utilizando el método de Hampel variando K para no eliminar más del 20% de los datos de esta central se logró un R^2 de 66%, considerado un indicador potencial que explica la relación entre los datos. Para la central PROELECTRICA 1 el coeficiente paso de un R^2 moderado 65,85% a un indicador potencialmente fuerte de 83,10%. Para las otras cuatro centrales los valores iniciales de R^2 estaban por encima del 75%, luego de filtrar los datos logro llevar estos indicadores a valores por encima 90% para las LBE de estos llegando al rango de ser considerados indicadores fuertes y excelentes que explican el comportamiento de los datos, cumpliendo la recomendación de la norma ISO 50006.

El potencial de ahorro del 5,09% y de deterioro -6,70% obtenidos para la central TEBSAB son considerables dado que este central muestra en la gráfica 1 que ha consumido el 52,13% de todo el gas natural utilizado en el sector termoeléctrico, por tal motivo un porcentaje de ahorro de esta cifra es importante para mejorar el consumo de combustible en el sector termoeléctrico. El porcentaje de ahorro de TEBSAB es más alto, en comparación con el de TERMOYOPAL 2,10% y TERMOSIERRAB 3,12%. Estos valores pueden explicarse, al observar las gráficas del indicador base 100, mostrado en la tabla 10, porque se muestra que los valores de desempeño mensual se mantuvieron cercanos a la línea del 100%. TERMOYOPAL en este grafico tubo variaciones constantes entre desempeños conforme y no conforme, aunque todos

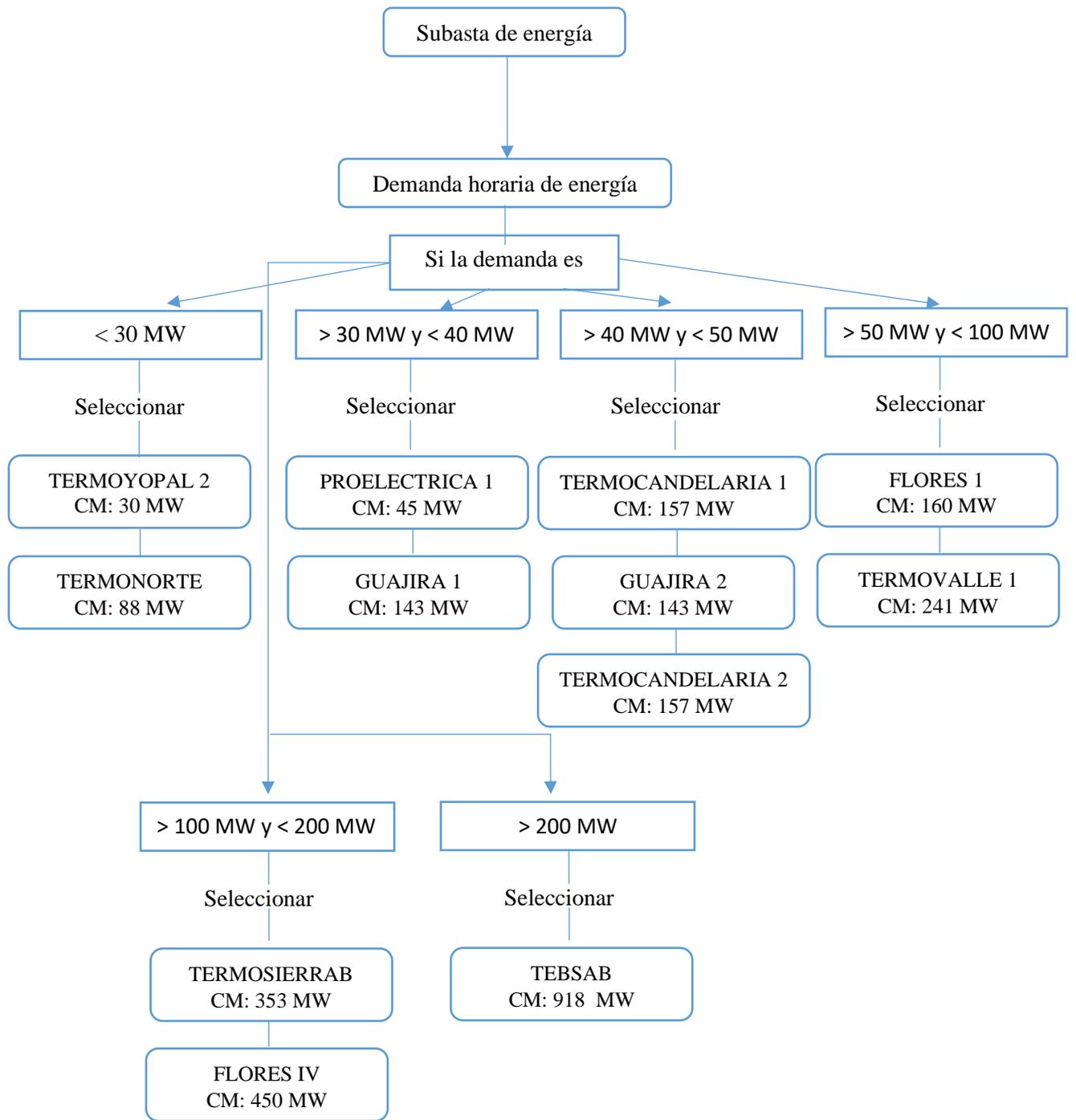
sus picos mantuvieron diferencias de ± 4 . TERMOSIERRAB muestra en todos los meses del 2020 valores cercanos al 100% sin mucha diferencia entre picos, en meses anteriores se destacan seis puntos por debajo de 100%, con valores cercanos al 60%, es decir, desempeño no conforme. Estos pueden explicarse por medio del consumo estimado a través de la LBE, valor dependiente de la generación de energía, este dato puede ser mucho menor al consumo real en esos periodos, porque corresponden al consumo de combustible utilizado en pruebas no autorizadas y pruebas de disponibilidad, por tal motivo se reportó una generación de energía menor a la real. Para las otras tres centrales los porcentajes de ahorro son mayores al 14% y los gráficos de B100 muestran que varían constantemente entre desempeño conforme (valores por encima de 100%) y no conforme (por debajo de 100%). Se observan valores de hasta 190% de desempeño conforme, lo que afecta el porcentaje de ahorro obtenido.

El indicador de tendencia del desempeño energético mostrado en los gráficos de la tabla 10, muestra que TEBSAB, FLORES IV, FLORES 1 y PROELECTRICA tenían un desempeño eficiente (datos por debajo del eje de las x) hasta el 2019, luego esta tendencia cambia en el 2020, dejando el valor final cercano a 0 o por encima de este (desempeño ineficiente). Por otra parte, el grafico de TERMOSIERRA y TERMOYOPAL2 se mantuvieron variando entre desempeño eficiente e ineficiente.

En la tabla 11 se muestra la producción crítica para las centrales objetivo y otras, se destaca, que TEBSAB tenga el valor de 334,6 MW el más alto de entre todas las analizadas, seguido de FLORES IV con una cifra de 178,31MW. Estos resultados se pueden relacionar con la capacidad de generación de energía instalada, estas dos

centrales TEBSAB Y FLORES IV tienen valores 918 MW y 450 MW respectivamente. Por tal motivo el proceso de generación de energía, tiene un consumo mayor de combustible, en comparación a centrales de menor capacidad como PROELECTRICA, TERMOSIERRA, TERMOYOPAL2 y FLORES 1. Es decir, TEBSAB y FLORES IV tienen un valor de energía no asociada a la producción más alto que las otras centrales, como se observa en las ecuaciones correspondientes de LBE, Línea Meta y Línea De Deterioro mostradas en las tablas 3 y 4. Esto se debe a que en la medida que la generación de energía disminuye es posible que disminuya el consumo total de gas, pero el gasto energético por unidad de MW generado aumenta, ya que la energía no asociada a la producción se mantiene prácticamente constante.

Teniendo en cuenta lo anterior, los valores de PC son un referente importante para tener un aprovechamiento eficiente del gas, con el fin de asegurar que la generación de energía eléctrica horaria sea afectada lo menos posible por la energía no asociada a la producción. Lo que implicaría un cambio en el modelo de mercado energético colombiano pasando de estar regido por criterios de economía, calidad, seguridad y confiabilidad a incluirse un criterio de eficiencia en el consumo de gas para la generación de energía basado en PC. La figura 6 muestra una hoja de ruta para operar el mercado energético colombiano teniendo en cuenta la PC de cada planta y su capacidad máxima de operación (CM), de tal forma, que se emplee un criterio de consumo eficiente de gas, al momento de elegir qué central termoeléctrica operara según el requerimiento de energía.



8. CONCLUSIONES

Con los resultados anteriores se observa que existe un potencial de mejora en el consumo de gas para la generación de energía eléctrica, destacando el caso de la central termoeléctrica TEBSAB por su alto consumo de combustible en el país. Además, las centrales FLORES 1, PROELECTRICA y FLORES IV tienen porcentajes de ahorro que deben ser atendidos, para ser reducidos y que pueden explicarse por medio del grafico indicado de base 100. En el grafico CUSUM se observa que las centrales TEBSAB, FLORES IV, FLORES 1 y PROELECTRICA tenían desempeño eficiente hasta el 2019, después de marzo del 2020 se observa una tendencia a tener desempeño ineficiente, este periodo de tiempo coincide con el inicio de la cuarentena debido al COVID-19. Por lo que es posible que la pandemia afectara la eficiencia en estas centrales, debido a prácticas ineficientes de sus trabajadores. Dada esta posibilidad se debe considerar que los datos del año 2020 pudieron introducir un sesgo en los resultados del estudio. Los valores de producción crítica y la figura 6 se pueden utilizar como un plan de acción para mejorar la eficiencia del consumo de gas para la generación de energía eléctrica, para evitar que esta sea afectada lo menos posible por la energía no asociada a la producción.

En el estudio no se encontró indicios de relación entre la capacidad total de la termoeléctrica y el porcentaje de ahorro, como se esperaba en comparación a Xie et al., 2019, por otra parte no se observa relación entre el porcentaje de ahorro de la central y tiempo de funcionamiento, como fue el caso de Jindal & Nilakantan, 2021. En el estudio no pudo constatar relación entre potencial de mejorar en el consumo de gas y la ubicación geográfica de la central porque el clima entre los centrales análisis no varía más de cinco grados en términos de temperatura.

9. BIBLIOGRAFÍA

Balitskiy, S., Bilan, Y., Strielkowski, W., & Štreimikiene, D. (2016). Energy efficiency and natural gas consumption in the context of economic development in the European Union. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55, 156–168.

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.053>

Briano, J. I., Jesús Baez, M., & Moya Morales, R. (2016). Eficiencia energética en Colombia : Identificación de oportunidades. *Ingeniare*, 26(1), 60.

<http://biblioteca.olade.org/opac-tmpl/Documentos/cg00485.pdf>

Cabello Eras, J. J., Sagastume Gutiérrez, A., Sousa Santos, V., & Cabello Ulloa, M. J. (2020). Energy management of compressed air systems. Assessing the production and use of compressed air in industry. *Energy*, 213.

<https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118662>

Cabello Eras, J. 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. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.192>

Campos, J. C. (2017). *Línea base, Indicadores de desempeño Energético*.

<http://guiaiso50001.cl/guia/wp-content/uploads/2017/05/linea-base-indicadores-de-desempeno-P-3-AP-1.pdf>

Castrillón-Mendoza, R., Rey-Hernández, J. M., & Rey-Martínez, F. J. (2020). Industrial decarbonization by a new energy-baseline methodology. Case study. *Sustainability (Switzerland)*, 12(5). <https://doi.org/10.3390/su12051960>

- Castrillón, R., Rey, F. J., & Puente, O. (2018). El Establecimiento de Líneas de Bases Energéticas Según ISO 50001 . Una Contribución a la Producción. *7th Academic International Workshop Advances In Cleaner Production*, 1–10.
- Dzene, I., Polikarpova, I., Zogla, L., & Rosa, M. (2015). Application of ISO 50001 for Implementation of Sustainable Energy Action Plans. *Energy Procedia*, 72, 111–118. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.06.016>
- Eras, J. C., Santos, V. S., Gutierrez, A. S., & Vandecasteele, C. (2019). Data supporting the improvement of forecasting and control of electricity consumption in hotels. *Data in Brief*, 25. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2019.104147>
- Fan, J. L., Zhang, H., & Zhang, X. (2020). Unified efficiency measurement of coal-fired power plants in China considering group heterogeneity and technological gaps. *Energy Economics*, 88. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2020.104751>
- Fichera, A., Volpe, R., & Cutore, E. (2020). Energy performance measurement, monitoring and control for buildings of public organizations: Standardized practises compliant with the ISO 50001 and ISO 50006. *Developments in the Built Environment*, 4(July), 100024. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2020.100024>
- Finnerty, N., Sterling, R., Coakley, D., & Keane, M. M. (2017). An energy management maturity model for multi-site industrial organisations with a global presence. *Journal of Cleaner Production*, 167, 1232–1250. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.192>
- Hampel, F. R. (1974). The Influence Curve and its Role in Robust Estimation. *Journal of the American Statistical Association*, January 2014, 37–41.
- International Energy Agency. (2016). Indicadores de Eficiencia Energética: Fundamentos

Estadísticos. In *IEA Publications* (Primera).

www.iea.org/books%0Ahttps://www.iea.org/publications/freepublications/publication/IndicadoresdeEficienciaEnergética_FundamentosEstadísticos.pdf

Jin, Y., Long, Y., Jin, S., Yang, Q., Chen, B., Li, Y., & Xu, L. (2021). An energy management maturity model for China: Linking ISO 50001:2018 and domestic practices. *Journal of Cleaner Production*, 290, 125168.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125168>

Jindal, A., & Nilakantan, R. (2021). Falling efficiency levels of Indian coal-fired power plants: A slacks-based analysis. *Energy Economics*, 93, 105022.

<https://doi.org/10.1016/j.eneco.2020.105022>

Jorge Fernández Gómez. (2021). *Eficiencia Energética En El Sector Industrial*. http://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/13678/PFC_Diego_Sevilleja.pdf;jsessionid=F1B8AF45E8F848D99116638255597C4?sequence=1

Kanneganti, H., Gopalakrishnan, B., Crowe, E., Al-Shebeeb, O., Yelamanchi, T., Nimbarde, A., Currie, K., & Abolhassani, A. (2017). Specification of energy assessment methodologies to satisfy ISO 50001 energy management standard. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 23(June), 121–135.

<https://doi.org/10.1016/j.seta.2017.09.003>

Kluczek, A., & Olszewski, P. (2017). Energy audits in industrial processes. *Journal of Cleaner Production*, 142(2017), 3437–3453.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.123>

McKane, A., Therkelsen, P., Scodel, A., Rao, P., Aghajanzadeh, A., Hirzel, S., Zhang, R.,

Prem, R., Fossa, A., Lazarevska, A. M., Matteini, M., Schreck, B., Allard, F., Villegal Alcántar, N., Steyn, K., Hürdoğan, E., Björkman, T., & O'Sullivan, J. (2017). Predicting the quantifiable impacts of ISO 50001 on climate change mitigation. *Energy Policy*, 107(May), 278–288. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.04.049>

Menghi, R., Papetti, A., Germani, M., & Marconi, M. (2019). Energy efficiency of manufacturing systems: A review of energy assessment methods and tools. *Journal of Cleaner Production*, 240, 118276. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118276>

Ocampo Batlle, E. A., Escobar Palacio, J. C., Silva Lora, E. E., Martínez Reyes, A. M., Melian Moreno, M., & Morejón, M. B. (2020). A methodology to estimate baseline energy use and quantify savings in electrical energy consumption in higher education institution buildings: Case study, Federal University of Itajubá (UNIFEI). *Journal of Cleaner Production*, 244. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118551>

Omar Fredy Prias Caicedo, Juan Carlos Campos Avella, David Bernardo Rojas Rodríguez, A. P. S. (2019). *Implementación de un sistema de Gestión de la Energía Guía con base en la norma ISO* (A. P. S. O. F. P. C. J. C. C. A. David Bernardo Rojas Rodríguez (ed.); Segunda Ed). RED COLOMBIANA DE CONOCIMIENTO EN EFICIENCIA ENERGÉTICA - RECIEE. https://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/EEIColombia/Guia_estructura_ISO5001.pdf

Poveda-Orjuela, P. P., García-Díaz, J. C., Pulido-Rojano, A., & Cañón-Zabala, G. (2019). ISO 50001: 2018 and its application in a comprehensive management system with an energy-performance focus. *Energies*, 12(24). <https://doi.org/10.3390/en12244700>

- Sagastume Gutiérrez, A., Cabello Eras, J. J., Sousa Santos, V., Hernández Herrera, H., Hens, L., & Vandecasteele, C. (2018). Electricity management in the production of lead-acid batteries: The industrial case of a production plant in Colombia. *Journal of Cleaner Production*, 198, 1443–1458. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.105>
- Statgraphics Technologies, I. (2020). *Statgraphics* (Centurion 19). <http://statgraphics.com/>
- Sueyoshi, T., Liu, X., & Li, A. (2020). Evaluating the performance of Chinese fossil fuel power plants by data environment analysis: An application of three intermediate approaches in a time horizon. *Journal of Cleaner Production*, 277, 121992. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121992>
- Sunthornnapha, T. (2017). Utilization of MLP and Linear Regression Methods to Build a Reliable Energy Baseline for Self-benchmarking Evaluation. *Energy Procedia*, 141, 189–193. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.11.036>
- Xie, J., Liang, Z., Zhang, X., & Zhu, L. (2019). Efficiency evaluation of thermal power plants in China based on the weighted Russell directional distance method. *Journal of Cleaner Production*, 222, 573–583. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.078>
- Alcogen. (s.f.). *Capacidad instalada*. Obtenido de <https://www.acolgen.org.co/#:~:text=Capacidad%20instalada-,en%20Colombia,son%20plantas%20de%20fuentes%20renovables>
- andeg. (15 de Junio de 2021). Obtenido de <https://www.andeg.org/>

Daniel, D. (3 de Febrero de 2020). *wenuwork*. Obtenido de <https://wenuwork.cl/eficiencia-energetica-que-es-y-cuales-son-sus-beneficios-para-la-empresa/>

Grupo ISA. (21 de mayo de 2021). *XM* . Obtenido de Despacho térmico:
<https://www.xm.com.co/Paginas/Generacion/Despacho-Termico.aspx>

ISO 50001. (2018). *ENERGY MANAGEMENT*. Washington, DC: American National Standards Institute.

ISO 50006. (2014). *Energy management systems — Measuring energy performance using energy baselines (EnB) and energy performance indicators (EnPI) — General principles and guidance*. Washington, DC: American National Standards Institute.

Kreith, F. y. (5 de Abril de 2011). *Handbook of Energy Efficiency and Renewable Energy*. Obtenido de <http://www.eia.gov/todayinenergy/detail.cfm?id=811>

SIEL. (3 de junio de 2021). *upme* . Obtenido de Consumo de Combustible:
[http://www.upme.gov.co/Reports/Default.aspx?ReportPath=%2fSIEL+UPME%2fG eneraci%u00f3n%2fConsumo+de+Combustible+\(SIN\)](http://www.upme.gov.co/Reports/Default.aspx?ReportPath=%2fSIEL+UPME%2fG eneraci%u00f3n%2fConsumo+de+Combustible+(SIN))

Umpe. (Febrero de 2015). *Balance de Gas Natural en Colombia*. Obtenido de
https://www1.upme.gov.co/Hidrocarburos/publicaciones/BALANCE_GAS_NATURAL_FINAL.pdf

Upme. (2020). *Plan Energético Nacional 2020 - 2050*. Obtenido de
https://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/PEN_2020_2050/Plan_Energetico_Nacional_2020_2050.pdf

XM. (18 de Junio de 2021). *Mercado de energia*. Obtenido de

<https://www.xm.com.co/Paginas/Mercado-de-energia/descripcion-del-sistema-electrico-colombiano.aspx>

10. ANEXOS

TEBSAB	K=1,6	Generación [MW]	Consumo de GAS [MBTU]	Consumo estimado	DIFERENCIA	MEDIANA	ABS	MAD	LI	LS
2018	enero	302077	2988373,6	2646266,56	342.107,04	-24.851,20	366.958,24	222.687,06	-381.150,50	331.448,10
	febrero	352607,303	2648328,08	2876525,06	-228.196,98	-24.851,20	203.345,78	222.687,06	-381.150,50	331.448,10
	marzo	349872	3107248,67	2864060,72	243.187,95	-24.851,20	268.039,15	222.687,06	-381.150,50	331.448,10
	abril	309797	2826615,29	2681445,36	145.169,93	-24.851,20	170.021,13	222.687,06	-381.150,50	331.448,10
	mayo	341113	2641534,44	2824147,36	-182.612,92	-24.851,20	157.761,72	222.687,06	-381.150,50	331.448,10
	junio	271698	2346720,52	2507834,31	-161.113,79	-24.851,20	136.262,59	222.687,06	-381.150,50	331.448,10
	julio	294818	2653421,03	2613188,46	40.232,58	-24.851,20	65.083,78	222.687,06	-381.150,50	331.448,10
	agosto	337051	2526322,48	2805637,48	-279.315,00	-24.851,20	254.463,80	222.687,06	-381.150,50	331.448,10
	septiembre	308799	2486456,72	2676897,64	-190.440,92	-24.851,20	165.589,71	222.687,06	-381.150,50	331.448,10
	octubre	312434	2620671,73	2693461,75	-72.790,02	-24.851,20	47.938,81	222.687,06	-381.150,50	331.448,10
	noviembre	292376	2448199,58	2602060,65	-153.861,07	-24.851,20	129.009,87	222.687,06	-381.150,50	331.448,10
	diciembre	307030	2584508,8	2668836,59	-84.327,79	-24.851,20	59.476,59	222.687,06	-381.150,50	331.448,10
2019	enero	291097	2507331,14	2596232,45	-88.901,31	-24.851,20	64.050,11	222.687,06	-381.150,50	331.448,10
	febrero	277841	2206217	2535826,98	-329.609,98	-24.851,20	304.758,78	222.687,06	-381.150,50	331.448,10
	marzo	254214	2116326	2428162,52	-311.836,52	-24.851,20	286.985,32	222.687,06	-381.150,50	331.448,10
	abril	235091	1818697	2341022,07	-522.325,07	-24.851,20	497.473,87	222.687,06	-381.150,50	331.448,10
	mayo	210297	2199350	2228039,78	-28.689,78	-24.851,20	3.838,58	222.687,06	-381.150,50	331.448,10
	junio	192358	2171176	2146294,63	24.881,37	-24.851,20	49.732,57	222.687,06	-381.150,50	331.448,10
	julio	244784	2243173	2385191,52	-142.018,52	-24.851,20	117.167,32	222.687,06	-381.150,50	331.448,10
	agosto	240053	2690865	2363633,11	327.231,89	-24.851,20	352.083,09	222.687,06	-381.150,50	331.448,10
	septiembre	236816	2327870	2348882,62	-21.012,62	-24.851,20	3.838,58	222.687,06	-381.150,50	331.448,10
	octubre	278346	2655916	2538128,19	117.787,81	-24.851,20	142.639,01	222.687,06	-381.150,50	331.448,10
	noviembre	259645	2561024,25	2452910,72	108.113,53	-24.851,20	132.964,73	222.687,06	-381.150,50	331.448,10
	diciembre	299658	2949690,61	2635243,56	314.447,05	-24.851,20	339.298,25	222.687,06	-381.150,50	331.448,10
2020	enero	282635	2906816,48	2557672,47	349.144,01	-24.851,20	373.995,21	222.687,06	-381.150,50	331.448,10
	febrero	385466	3320794,41	3026256,89	294.537,53	-24.851,20	319.388,73	222.687,06	-381.150,50	331.448,10
	marzo	321608	2702400,9	2735266,2	-32.865,30	-24.851,20	8.014,10	222.687,06	-381.150,50	331.448,10
	abril	152428	1871845,18	1964340,01	-92.494,83	-24.851,20	67.643,63	222.687,06	-381.150,50	331.448,10
	mayo	241884	2413542,62	2371976,69	41.565,93	-24.851,20	66.417,14	222.687,06	-381.150,50	331.448,10
	junio	210142	2278660,8	2227333,47	51.327,33	-24.851,20	76.178,53	222.687,06	-381.150,50	331.448,10
	julio	191894	2093782,02	2144180,25	-50.398,24	-24.851,20	25.547,04	222.687,06	-381.150,50	331.448,10
	agosto	233766	2391743,34	2334984,26	56.759,08	-24.851,20	81.610,28	222.687,06	-381.150,50	331.448,10
	septiembre	272298	2113482,59	2510568,42	-397.085,83	-24.851,20	372.234,63	222.687,06	-381.150,50	331.448,10
	octubre	178,899	2499386,99	1270565,21	1.228.821,78	-24.851,20	1.253.672,98	222.687,06	-381.150,50	331.448,10
	noviembre	265,012	2770660,98	1270957,62	1.499.703,36	-24.851,20	1.524.554,56	222.687,06	-381.150,50	331.448,10
	diciembre	286800	2782310,49	2576651,71	205.658,78	-24.851,20	230.509,98	222.687,06	-381.150,50	331.448,10

Tabla 12. Proceso de filtrado para los datos generación de energía y consumo de gas para TEBSAB.

FLORESIV		Generación MW	Consumo de GAS [MBTU]	Consumo estimado	DIFERENCIA	MEDIANA	ABS	MAD	LI	LS
k=	1,5									
2018	febrero	199933	980569,72	1089298,34	-108.728,62	3.048,99	111.777,61	111.777,61	-	170.715,40
	marzo	125349	474897,67	677350,0247	-202.452,35	3.048,99	205.501,34	111.777,61	-	170.715,40
	abril	32212	94356,94	162928,2954	-68.571,36	3.048,99	71.620,34	111.777,61	-	170.715,40
	mayo	53154	162710,78	278596,8251	-115.886,05	3.048,99	118.935,03	111.777,61	-	170.715,40
	junio	144468	770747,96	782949,615	-12.201,66	3.048,99	15.250,64	111.777,61	-	170.715,40
	julio	72790	245170,98	387051,9512	-141.880,97	3.048,99	144.929,96	111.777,61	-	170.715,40
	agosto	120920	512997,04	652887,4176	-139.890,38	3.048,99	142.939,36	111.777,61	-	170.715,40
	septiembre	99261	602698,35	533258,6961	69.439,65	3.048,99	66.390,67	111.777,61	-	170.715,40
	octubre	102001	663520,71	548392,4833	115.128,23	3.048,99	112.079,24	111.777,61	-	170.715,40
	noviembre	79270	398681,75	422842,8056	-24.161,06	3.048,99	27.210,04	111.777,61	-	170.715,40
	diciembre	58132	325973,93	306091,713	19.882,22	3.048,99	16.833,23	111.777,61	-	170.715,40
	2019	enero	39065	150784,72	200779,3332	-49.994,61	3.048,99	53.043,60	111.777,61	-
febrero		105765	392438	569182,1092	-176.744,11	3.048,99	179.793,10	111.777,61	-	170.715,40
marzo		76788	370897	409134,0246	-38.237,02	3.048,99	41.286,01	111.777,61	-	170.715,40
abril		70723	286777	375635,3314	-88.858,33	3.048,99	91.907,32	111.777,61	-	170.715,40
mayo		31494	108462	158962,5803	-50.500,58	3.048,99	53.549,57	111.777,61	-	170.715,40
junio		79287	252730	422936,7014	-170.206,70	3.048,99	173.255,69	111.777,61	-	170.715,40
julio		24220	203849	118786,2416	85.062,76	3.048,99	82.013,77	111.777,61	-	170.715,40
agosto		105927	692044	570076,8806	121.967,12	3.048,99	118.918,13	111.777,61	-	170.715,40
septiembre		215779	1217518	1176820,235	40.697,76	3.048,99	37.648,78	111.777,61	-	170.715,40
octubre		199666	1468039	1087823,624	380.215,38	3.048,99	377.166,39	111.777,61	-	170.715,40
noviembre		102093	915048,28	548900,625	366.147,65	3.048,99	363.098,67	111.777,61	-	170.715,40
diciembre		143127	825897,83	775542,8966	50.354,93	3.048,99	47.305,95	111.777,61	-	170.715,40
2020	enero	205061,2601	1274633,96	1117623,157	157.010,80	3.048,99	153.961,82	111.777,61	-	170.715,40
	febrero	59051,8354	496377,58	311172,2214	185.205,36	3.048,99	182.156,37	111.777,61	-	170.715,40
	marzo	109492,2353	592817,66	589768,6734	3.048,99	3.048,99	0,00	111.777,61	-	170.715,40
	abril	118491,4548	614478,25	639473,8824	-24.995,63	3.048,99	28.044,62	111.777,61	-	170.715,40
	mayo	15379,39712	160069,94	69957,11652	90.112,82	3.048,99	87.063,84	111.777,61	-	170.715,40
	junio	158309,4089	410608,38	859399,5917	-448.791,21	3.048,99	451.840,20	111.777,61	-	170.715,40
	julio	82068,83734	499805,84	438301,5679	61.504,27	3.048,99	58.455,29	111.777,61	-	170.715,40
	agosto	52193,99717	390464,06	273294,4607	117.169,60	3.048,99	114.120,61	111.777,61	-	170.715,40
	septiembre	94586,93459	442342,96	507442,5241	-65.099,56	3.048,99	68.148,55	111.777,61	-	170.715,40

	octubre	196616,5837	1200890,36	1070980,844	129.909,52	3.048,99	126.860,53	111.777,61	- 164.617,42	170.715,40
	noviembre	56583,57955	453006,75	297539,3533	155.467,40	3.048,99	152.418,41	111.777,61	- 164.617,42	170.715,40
	diciembre	25350,75172	240069,68	125031,7	115.037,98	3.048,99	111.988,99	111.777,61	- 164.617,42	170.715,40

Tabla 13. Proceso de filtrado para los datos generación de energía y consumo de gas para FLORES IV

TERMOSIERRAB		Generación MW	Consumo de GAS [MBTU]	Consumo estimado	DIFERENCIA	MEDIANA	ABS	MAD	LI	LS
k=	3									
2018	febrero	3744	29530,61	24769,7558	4760,85416	3384,72782	1376,12634	13548,7534	-37261,5323	44030,988
	abril	3299	11448,18	21404,5056	-9956,32564	3384,72782	13341,0535	13548,7534	-37261,5323	44030,988
	junio	4634	35655,8	31500,2562	4155,54376	3384,72782	770,81594	13548,7534	-37261,5323	44030,988
	septiembre	1908	20040,12	10885,2629	9154,85712	3384,72782	5770,1293	13548,7534	-37261,5323	44030,988
	noviembre	25805	83315,6696	191602,98	-108287,31	3384,72782	111672,038	13548,7534	-37261,5323	44030,988
2019	enero	3075	28386,3672	19710,537	8675,83018	3384,72782	5291,10236	13548,7534	-37261,5323	44030,988
	marzo	7038	13575	49680,1697	-36105,1697	3384,72782	39489,8975	13548,7534	-37261,5323	44030,988
	mayo	1817	12811	10197,0881	2613,91188	3384,72782	770,81594	13548,7534	-37261,5323	44030,988
	septiembre	5326	38457	36733,4094	1723,59064	3384,72782	1661,13718	13548,7534	-37261,5323	44030,988
	noviembre	4178	17680,0946	28051,8201	-10371,7255	3384,72782	13756,4533	13548,7534	-37261,5323	44030,988
	diciembre	161370	1083928,42	1216794,31	-132865,896	3384,72782	136250,624	13548,7534	-37261,5323	44030,988
2020	enero	146073	1120648,3	1101112,89	19535,4069	3384,72782	16150,6791	13548,7534	-37261,5323	44030,988
	febrero	142246	1067124,59	1072171,74	-5047,15156	3384,72782	8431,87938	13548,7534	-37261,5323	44030,988
	marzo	147356	1121843,22	1110815,4	11027,8178	3384,72782	7643,09002	13548,7534	-37261,5323	44030,988
	abril	137890	1081643,77	1039230,1	42413,6681	3384,72782	39028,9403	13548,7534	-37261,5323	44030,988
	mayo	144748	1092699,69	1091092,77	1606,92926	3384,72782	1777,79856	13548,7534	-37261,5323	44030,988
	junio	139500	1087767,64	1051405,5	36362,14	3384,72782	32977,4122	13548,7534	-37261,5323	44030,988
	julio	58658	599227,13	440049,193	159177,937	3384,72782	155793,209	13548,7534	-37261,5323	44030,988
	agosto	141452	1084266,58	1066167,23	18099,3533	3384,72782	14714,6255	13548,7534	-37261,5323	44030,988
	septiembre	140422	1041709,94	1058378	-16668,0559	3384,72782	20052,7837	13548,7534	-37261,5323	44030,988

Tabla 14. Proceso de filtrado para los datos generación de energía y consumo de gas para TERMOSIERRA.

TERMOYOPAL2		Generación [MW]	Consumo de GAS [MBTU]	Consumo estimado	DIFERENCIA	MEDIANA	ABS	MAD	LI	LS
K=2										
2018	enero	21600	291897,04	285132,85	6.764,19	1.465,29	5.298,90	6.016,27	-10.567,25	13.497,83
	febrero	20048	261643,24	265175,992	-3.532,75	1.465,29	4.998,05	6.016,27	-10.567,25	13.497,83
	marzo	22092	288475,22	291459,38	-2.984,16	1.465,29	4.449,45	6.016,27	-10.567,25	13.497,83
	abril	18216	250799,63	241618,671	9.180,96	1.465,29	7.715,67	6.016,27	-10.567,25	13.497,83
	mayo	21965	290476,7	289826,312	650,39	1.465,29	814,90	6.016,27	-10.567,25	13.497,83
	junio	21424	282225,43	282869,701	-644,27	1.465,29	2.109,56	6.016,27	-10.567,25	13.497,83
	julio	19729	264391,29	261074,035	3.317,25	1.465,29	1.851,96	6.016,27	-10.567,25	13.497,83
	agosto	18730	248445,98	248228,094	217,89	1.465,29	1.247,41	6.016,27	-10.567,25	13.497,83
	septiembre	19961	282833,94	264057,277	18.776,66	1.465,29	17.311,37	6.016,27	-10.567,25	13.497,83
	octubre	22278	285135,68	293851,116	-8.715,44	1.465,29	10.180,73	6.016,27	-10.567,25	13.497,83
	noviembre	20736	285672,1	274022,847	11.649,25	1.465,29	10.183,96	6.016,27	-10.567,25	13.497,83
	diciembre	21964	293710,01	289813,453	3.896,56	1.465,29	2.431,26	6.016,27	-10.567,25	13.497,83
2019	enero	21505	283403,83	283911,264	-507,43	1.465,29	1.972,73	6.016,27	-10.567,25	13.497,83
	febrero	18472	251753	244910,524	6.842,48	1.465,29	5.377,18	6.016,27	-10.567,25	13.497,83
	marzo	21543	274045	284399,898	-10.354,90	1.465,29	11.820,19	6.016,27	-10.567,25	13.497,83
	abril	21220	281981	280246,506	1.734,49	1.465,29	269,20	6.016,27	-10.567,25	13.497,83
	mayo	21374	292116	282226,761	9.889,24	1.465,29	8.423,95	6.016,27	-10.567,25	13.497,83
	junio	21360	276319	282046,738	-5.727,74	1.465,29	7.193,03	6.016,27	-10.567,25	13.497,83
	julio	21184	294877	279783,589	15.093,41	1.465,29	13.628,12	6.016,27	-10.567,25	13.497,83
	agosto	20243	275188	267683,458	7.504,54	1.465,29	6.039,25	6.016,27	-10.567,25	13.497,83
	septiembre	18986	265843	251519,947	14.323,05	1.465,29	12.857,76	6.016,27	-10.567,25	13.497,83
	octubre	20622	282976	272556,944	10.419,06	1.465,29	8.953,76	6.016,27	-10.567,25	13.497,83
	noviembre	21244	276574,64	280555,117	-3.980,48	1.465,29	5.445,77	6.016,27	-10.567,25	13.497,83
	diciembre	21631	287302,25	285531,473	1.770,78	1.465,29	305,48	6.016,27	-10.567,25	13.497,83
2020	enero	21560	295111,74	284618,498	10.493,24	1.465,29	9.027,95	6.016,27	-10.567,25	13.497,83
	febrero	20765	276118,84	274395,752	1.723,09	1.465,29	257,80	6.016,27	-10.567,25	13.497,83
	marzo	18820	242909,91	249385,386	-6.475,48	1.465,29	7.940,77	6.016,27	-10.567,25	13.497,83
	abril	7073	99540,56	98333,0624	1.207,50	1.465,29	257,80	6.016,27	-10.567,25	13.497,83
	mayo	20079	276190,21	265574,615	10.615,59	1.465,29	9.150,30	6.016,27	-10.567,25	13.497,83
	junio	16748	214960,79	222741,952	-7.781,16	1.465,29	9.246,46	6.016,27	-10.567,25	13.497,83
	julio	20190	227625,33	267001,942	-39.376,61	1.465,29	40.841,90	6.016,27	-10.567,25	13.497,83
	agosto	22310	293260,02	294262,598	-1.002,58	1.465,29	2.467,87	6.016,27	-10.567,25	13.497,83
	septiembre	17152	223408,91	227936,908	-4.528,00	1.465,29	5.993,29	6.016,27	-10.567,25	13.497,83
	octubre	16820	206409,41	223667,786	-17.258,38	1.465,29	18.723,67	6.016,27	-10.567,25	13.497,83
	noviembre	19420	260043,78	257100,666	2.943,11	1.465,29	1.477,82	6.016,27	-10.567,25	13.497,83
	diciembre	21807	251661,4	287794,622	-36.133,22	1.465,29	37.598,51	6.016,27	-10.567,25	13.497,83

Tabla 15. Proceso de filtrado para los datos generación de energía y consumo de gas para TERMOYOPAL.

FLORES 1		Generación [MW]	Consumo de GAS [MBTU]	Consumo estimado	DIFERENCIA	MEDIANA	ABS	MAD	LI	LS
K=1,5										
2018	enero	27692	279903,46	244799,704	35.103,76	1.521,43	33.582,32	36.836,15	-53.732,79	56.775,65
	febrero	16911	139993,64	142521,7586	-2.528,12	1.521,43	4.049,55	36.836,15	-53.732,79	56.775,65
	marzo	26616	190890	234591,8319	-43.701,83	1.521,43	45.223,26	36.836,15	-53.732,79	56.775,65
	abril	30813	319537,61	274408,2253	45.129,38	1.521,43	43.607,95	36.836,15	-53.732,79	56.775,65
	mayo	29947	310288,25	266192,5959	44.095,65	1.521,43	42.574,22	36.836,15	-53.732,79	56.775,65
	junio	30113	230421,31	267767,4163	-37.346,11	1.521,43	38.867,54	36.836,15	-53.732,79	56.775,65
	julio	36478	312567,16	328151,3439	-15.584,18	1.521,43	17.105,62	36.836,15	-53.732,79	56.775,65
	agosto	35569	218881,56	319527,779	-100.646,22	1.521,43	102.167,65	36.836,15	-53.732,79	56.775,65
	septiembre	36779	318281,64	331006,8917	-12.725,25	1.521,43	14.246,68	36.836,15	-53.732,79	56.775,65
	octubre	42577	354658,63	386011,764	-31.353,13	1.521,43	32.874,57	36.836,15	-53.732,79	56.775,65
	noviembre	30691	190327,94	273250,8272	-82.922,89	1.521,43	84.444,32	36.836,15	-53.732,79	56.775,65
	diciembre	23200	248809,99	202184,684	46.625,31	1.521,43	45.103,87	36.836,15	-53.732,79	56.775,65
2019	enero	7783	95864,8	55925,60921	39.939,19	1.521,43	38.417,76	36.836,15	-53.732,79	56.775,65
	febrero	21528	136124	186322,6374	-50.198,64	1.521,43	51.720,07	36.836,15	-53.732,79	56.775,65
	marzo	8270	58314	60545,7149	-2.231,71	1.521,43	3.753,15	36.836,15	-53.732,79	56.775,65
	abril	15600	149624	130084,472	19.539,53	1.521,43	18.018,10	36.836,15	-53.732,79	56.775,65
	mayo	22840	213185	198769,4108	14.415,59	1.521,43	12.894,16	36.836,15	-53.732,79	56.775,65
	junio	12692	81002	102496,654	-21.494,65	1.521,43	23.016,09	36.836,15	-53.732,79	56.775,65
	julio	13052	82986	105911,9272	-22.925,93	1.521,43	24.447,36	36.836,15	-53.732,79	56.775,65
	agosto	28442	263771	251914,8565	11.856,14	1.521,43	10.334,71	36.836,15	-53.732,79	56.775,65
	septiembre	48613	424623	443274,5113	-18.651,51	1.521,43	20.172,94	36.836,15	-53.732,79	56.775,65
	octubre	44892	369855	407973,868	-38.118,87	1.521,43	39.640,30	36.836,15	-53.732,79	56.775,65
	noviembre	44252	457172,32	401902,2712	55.270,05	1.521,43	53.748,62	36.836,15	-53.732,79	56.775,65
	diciembre	14593	106051,96	120531,1939	-14.479,23	1.521,43	16.000,67	36.836,15	-53.732,79	56.775,65
2020	enero	16502	95321,5	138641,6287	-43.320,13	1.521,43	44.841,56	36.836,15	-53.732,79	56.775,65
	febrero	1540	18934,02	-3300,9202	22.234,94	1.521,43	20.713,51	36.836,15	-53.732,79	56.775,65
	marzo	52493	620806,93	480083,5669	140.723,36	1.521,43	139.201,93	36.836,15	-53.732,79	56.775,65
	abril	15366	94131,44	127864,5444	-33.733,10	1.521,43	35.254,54	36.836,15	-53.732,79	56.775,65
	mayo	7838	84030,09	56447,38706	27.582,70	1.521,43	26.061,27	36.836,15	-53.732,79	56.775,65
	junio	50023	517457,41	456650,998	60.806,41	1.521,43	59.284,98	36.836,15	-53.732,79	56.775,65
	julio	27773	250842,72	245568,1405	5.274,58	1.521,43	3.753,15	36.836,15	-53.732,79	56.775,65
	agosto	9778	124097,13	74851,91486	49.245,22	1.521,43	47.723,78	36.836,15	-53.732,79	56.775,65
	septiembre	30687	102162,42	273212,8797	-171.050,46	1.521,43	172.571,89	36.836,15	-53.732,79	56.775,65
	octubre	16490	160506,83	138527,7863	21.979,04	1.521,43	20.457,61	36.836,15	-53.732,79	56.775,65
	noviembre	23119	250656,34	201416,2475	49.240,09	1.521,43	47.718,66	36.836,15	-53.732,79	56.775,65
	diciembre	9428	125483,02	71531,51036	53.951,51	1.521,43	52.430,08	36.836,15	-53.732,79	56.775,65

Tabla 16. Proceso de filtrado para los datos generación de energía y consumo de gas para FLORES 1.

PROELECTRICA 1		Generación [MW]	Consumo de GAS [MBTU]	Consumo estimado	DIFERENCIA	MEDIANA	ABS	MAD	LI	LS
k=	2,5									
2018	enero	6290,6755	60131	64779,91705	-4.648,92	-5.988,01	1.339,09	32.480,12	-87.188,29	75.212,28
	febrero	40398,2068	237219	313805,4835	-76.586,48	-5.988,01	70.598,48	32.480,12	-87.188,29	75.212,28
	marzo	31585,0874	106996,01	249459,2242	-142.463,21	-5.988,01	136.475,21	32.480,12	-87.188,29	75.212,28
	abril	33005,0105	194919,003	259826,3525	-64.907,35	-5.988,01	58.919,34	32.480,12	-87.188,29	75.212,28
	mayo	31461,2457	97304,998	248555,0325	-151.250,03	-5.988,01	145.262,03	32.480,12	-87.188,29	75.212,28
	junio	27830,9686	140253,999	222049,6896	-81.795,69	-5.988,01	75.807,69	32.480,12	-87.188,29	75.212,28
	julio	37079,4402	256782	289574,5377	-32.792,54	-5.988,01	26.804,53	32.480,12	-87.188,29	75.212,28
	agosto	6640,23878	33140,001	67332,14498	-34.192,14	-5.988,01	28.204,14	32.480,12	-87.188,29	75.212,28
	septiembre	15436,0901	106310,001	131552,3269	-25.242,33	-5.988,01	19.254,32	32.480,12	-87.188,29	75.212,28
	octubre	16483,2917	84982,997	139198,1445	-54.215,15	-5.988,01	48.227,14	32.480,12	-87.188,29	75.212,28
	noviembre	16160,3875	95483,998	136840,5596	-41.356,56	-5.988,01	35.368,56	32.480,12	-87.188,29	75.212,28
	diciembre	33344,5259	265849,999	262305,2188	3.544,78	-5.988,01	9.532,79	32.480,12	-87.188,29	75.212,28
2019	enero	24681,0391	197498,003	199051,4559	-1.553,45	-5.988,01	4.434,55	32.480,12	-87.188,29	75.212,28
	febrero	25013,0936	194063	201475,8492	-7.412,85	-5.988,01	1.424,84	32.480,12	-87.188,29	75.212,28
	marzo	8432,41815	72954	80417,18707	-7.463,19	-5.988,01	1.475,18	32.480,12	-87.188,29	75.212,28
	abril	10456,4384	75597	95194,9437	-19.597,94	-5.988,01	13.609,94	32.480,12	-87.188,29	75.212,28
	mayo	12203,0318	99334	107947,154	-8.613,15	-5.988,01	2.625,15	32.480,12	-87.188,29	75.212,28
	junio	17813,4645	129604	148909,989	-19.305,99	-5.988,01	13.317,98	32.480,12	-87.188,29	75.212,28
	julio	24882,8405	193524	200524,8459	-7.000,85	-5.988,01	1.012,84	32.480,12	-87.188,29	75.212,28
	agosto	37282,253	304071	291055,3126	13.015,69	-5.988,01	19.003,69	32.480,12	-87.188,29	75.212,28
	septiembre	20183,9851	159880	166217,6104	-6.337,61	-5.988,01	349,61	32.480,12	-87.188,29	75.212,28
	octubre	23916,7725	187833	193471,4003	-5.638,40	-5.988,01	349,61	32.480,12	-87.188,29	75.212,28
	noviembre	19525,8062	186572,002	161412,1212	25.159,88	-5.988,01	31.147,89	32.480,12	-87.188,29	75.212,28
	diciembre	29429,8077	317213,006	233723,1178	83.489,89	-5.988,01	89.477,89	32.480,12	-87.188,29	75.212,28
2020	enero	39597,6689	372397	307960,6042	64.436,40	-5.988,01	70.424,40	32.480,12	-87.188,29	75.212,28
	febrero	51400,4673	480001,003	394135,0781	85.865,92	-5.988,01	91.853,93	32.480,12	-87.188,29	75.212,28
	marzo	35857,1692	340081	280650,5053	59.430,49	-5.988,01	65.418,50	32.480,12	-87.188,29	75.212,28
	abril	4445,98128	43958,606	51311,45406	-7.352,85	-5.988,01	1.364,84	32.480,12	-87.188,29	75.212,28
	mayo	31588,227	303781,998	249482,1472	54.299,85	-5.988,01	60.287,86	32.480,12	-87.188,29	75.212,28
	junio	25526,8409	248160,002	205226,8156	42.933,19	-5.988,01	48.921,19	32.480,12	-87.188,29	75.212,28
	julio	12900,2414	128495,001	113037,6132	15.457,39	-5.988,01	21.445,39	32.480,12	-87.188,29	75.212,28
	agosto	8473,29811	108539,998	80715,65943	27.824,34	-5.988,01	33.812,34	32.480,12	-87.188,29	75.212,28
	septiembre	13357,7385	236043,993	116377,8866	119.666,11	-5.988,01	125.654,11	32.480,12	-87.188,29	75.212,28
	octubre	19712,09	238326,003	162772,2144	75.553,79	-5.988,01	81.541,79	32.480,12	-87.188,29	75.212,28
	noviembre	9451	117646,003	87854,04669	29.791,96	-5.988,01	35.779,96	32.480,12	-87.188,29	75.212,28
	diciembre	23589,65	290341,398	191083,0167	99.258,38	-5.988,01	105.246,39	32.480,12	-87.188,29	75.212,28

Tabla 17. Proceso de filtrado para los datos generación de energía y consumo de gas para PROELECTRICA.