



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**  
**SEDE CUENCA**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**

**BALANCE Y PROSPECTIVA ENERGÉTICA**  
**APLICADO A LA INDUSTRIA CEMENTERA**

Trabajo de titulación previo a la obtención del  
título de Ingeniero Eléctrico

**AUTORES: CARLOS ANDRÉS CHIMBO VÁZQUEZ**  
**ANGÉLICA ROMINA ORTIZ GAVILANES**  
**TUTOR: ING. EDGAR ANTONIO BARRAGÁN ESCANDÓN, PhD.**

Cuenca - Ecuador  
2023

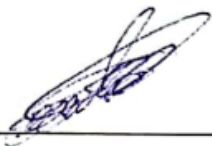
## CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Carlos Andrés Chimbo Vázquez con documento de identificación N° 0107592933 y Angélica Romina Ortiz Gavilanes con documento de identificación N° 0150539831; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Cuenca, 19 de febrero del 2024

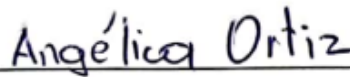
Atentamente,



---

Carlos Andrés Chimbo Vázquez

0107592933



---

Angélica Romina Ortiz Gavilanes

0150539831

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE  
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Nosotros, Carlos Andrés Chimbo Vázquez con documento de identificación N° 0107592933 y Angélica Romina Ortiz Gavilanes con documento de identificación N° 0150539831, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Proyecto técnico: “Balance y prospectiva energética aplicado a la industria cementera”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

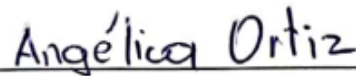
Cuenca, 19 de febrero del 2024

Atentamente,



---

Carlos Andrés Chimbo Vázquez  
0107592933



---

Angélica Romina Ortiz Gavilanes  
0150539831

## CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Edgar Antonio Barragán Escandón con documento de identificación N° 0102516457, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: “BALANCE Y PROSPECTIVA ENERGÉTICA APLICADO A LA INDUSTRIA CEMENTERA”, realizado por Carlos Andrés Chimbo Vázquez con documento de identificación N° 0107592933 y Angélica Romina Ortiz Gavilanes con documento de identificación N° 0150539831, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 19 de febrero de 2024

Atentamente,



Ph.D. Antonio Barragán

0102516457

## Resumen

Este estudio se centra en la comprensión y optimización del consumo de energía en la industria cementera a través de un análisis de balance energético utilizando un diagrama de flujo Sankey. Se analizan los procesos productivos del cemento, con un enfoque particular en el área de molienda y despacho, con el propósito de estimar el nivel de participación energética de los diversos equipos involucrados.

Con ello se busca analizar y mejorar la eficiencia energética en la industria cementera, con la intención de reducir los costos operativos, minimizar las emisiones de gases de efecto invernadero y fortalecer la sostenibilidad empresarial. Esto se lleva a cabo mediante el uso de software especializado para modelar y proyectar posibles escenarios que puedan presentarse en una industria con estas características. La información obtenida de estos modelos permite planificar estrategias y futuras mejoras de manera más precisa y fundamentada.

Se resalta la importancia de implementar prácticas de gestión energética eficientes y sostenibles dentro de las empresas del sector cementero. Esto no solo contribuirá a mejorar su competitividad en el mercado, sino que también demostrará un compromiso sólido con la responsabilidad ambiental y el desarrollo sostenible.

***Palabras claves:*** - *Industria cementera* - *Eficiencia energética* - *Modelo LEAP* - *Diagramas de Sankey* - *Flujos energéticos*

## Abstract

This study focuses on understanding and optimizing energy consumption in the cement industry through an analysis of energy balance using a Sankey flow diagram. Cement production processes are analyzed, with a particular focus on the grinding and dispatch area, in order to estimate the level of energy participation of the various equipment involved.

The aim is to analyze and improve energy efficiency in the cement industry, with the intention of reducing operational costs, minimizing greenhouse gas emissions, and strengthening business sustainability. This is done through the use of specialized software to model and project possible scenarios that may arise in an industry with these characteristics. The information obtained from these models allows for more precise and well-founded planning of strategies and future improvements.

The importance of implementing efficient and sustainable energy management practices within companies in the cement sector is highlighted. This will not only contribute to improving their competitiveness in the market but also demonstrate a solid commitment to environmental responsibility and sustainable development.

**Keywords:** *Cement industry Energy efficiency LEAP model Sankey diagrams Energy flows*

# Índice

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>6</b>
1.1	Justificación . . . . .	6
1.2	Estado del Arte . . . . .	7
1.3	Alcance . . . . .	11
1.4	Objetivos . . . . .	12
1.4.1	Objetivo General . . . . .	12
1.4.2	Objetivos Específicos . . . . .	12
<b>2</b>	<b>Marco Teórico</b>	<b>13</b>
2.1	Proceso de producción de cemento . . . . .	15
2.2	Sistema de control SCADA - Cementera Induatenas . . . . .	17
2.3	Diagramas Sankey . . . . .	19
2.4	Modelo LEAP . . . . .	19
<b>3</b>	<b>Metodología</b>	<b>22</b>
3.1	Preparación . . . . .	24
3.2	Planificación . . . . .	24
3.3	Ejecución . . . . .	25
3.3.1	Recolección de información básica e inventarios generales de la planta . . . . .	25
3.3.2	Procesamiento de datos. . . . .	26
3.3.3	Inclusión de Información . . . . .	27
3.3.4	Escenarios . . . . .	28
3.4	Reportes . . . . .	28
3.4.1	Reporte de proyecciones de mejora en eficiencia energética . . . . .	28
<b>4</b>	<b>Resultados</b>	<b>29</b>
<b>5</b>	<b>Discusión</b>	<b>42</b>
<b>6</b>	<b>Conclusiones y Recomendaciones</b>	<b>43</b>
6.1	Conclusiones . . . . .	43
6.2	Recomendaciones . . . . .	43

## Índice de figuras

1	Balance Nacional 2022 . . . . .	8
2	Tipos de energía empleados en la industria . . . . .	9
3	Proceso de producción del cemento . . . . .	16
4	Diagrama de flujo de la metodología . . . . .	23
5	Nivel de participación por área . . . . .	33
6	Nivel de participación de los equipos . . . . .	34
7	Nivel de participación energético Molino Vertical . . . . .	35
8	Diagrama de Sankey . . . . .	36
9	Balance Energético . . . . .	36
10	Tasa de crecimiento demanda . . . . .	37
11	Incremento de costo . . . . .	39
12	Eficiencia Molino Vertical . . . . .	40
13	Eficiencia Molino Vertical . . . . .	41
14	Mediciones de Tornillo sin Fin . . . . .	45
15	Mediciones de Paletizadora . . . . .	46
16	Mediciones del Elevador . . . . .	47
17	Mediciones del Compresor . . . . .	48
18	Mediciones de Ensacadora . . . . .	49
19	Mediciones de Ventilador de Tiro . . . . .	50
20	Mediciones en campo . . . . .	51
21	Mediciones en campo . . . . .	52
22	Mediciones con Power Quality System . . . . .	53

## Índice de tablas

1	Aplicaciones del Modelo LEAP [1]. . . . .	11
2	Identificación del establecimiento . . . . .	29
3	Régimen de producción de la planta . . . . .	29
4	Recursos Energéticos Induatenas en 2023 . . . . .	30
5	Horas de operación año base 2023 . . . . .	31
6	Nivel de participación equipos principales . . . . .	32
7	Evaluación del aporte de energía eléctrica de equipos en la planta Induatenas S.A . . . . .	32
8	Crecimiento demanda . . . . .	38
9	Eficiencia Molino Vertical . . . . .	40



# 1 INTRODUCCIÓN

## 1.1 Justificación

El balance energético desempeña un papel fundamental en la comprensión y optimización del consumo de energía en el ámbito industrial [2]. Su principal propósito radica en la identificación de entradas y salidas de energía dentro del proceso de una industria, con el fin de evaluar la eficiencia de cada sistema.

La industria cementera es conocida por tener un consumo intensivo en energía y generar altas emisiones de gases de efecto invernadero [3]. Por esto es crucial realizar un balance energético para mejorar fomentando procesos que mejoren su eficiencia, propiciando la disminución del consumo de combustibles, electricidad, entre otros recursos energéticos.

Al identificar las oportunidades de mejora y optimización energética la investigación puede ayudar a, reducir los costos operativos y mejorar la eficiencia de la empresa [4]. Además, al demostrar el compromiso de la compañía con la sostenibilidad y la responsabilidad ambiental, este estudio fortalecerá la imagen corporativa y su posición en el mercado.

Mediante el Diagrama Sankey se permite representar con detalle los flujos de energía en diversos sistemas. A diferencia de los planos convencionales, el Diagrama Sankey muestra de manera integral cómo la energía se distribuye y se transforma en un sistema, abarcando distintas formas de energía, como térmica, mecánica o química, entre otras.

Esto permitirá identificar los puntos críticos de consumo, pérdidas de energía y zonas de mejora lo que a su vez facilitará la toma de decisiones para optimizar el balance energético[5].

El diagrama proporciona una representación gráfica intuitiva que puede ser comprendida tanto por expertos en la materia como por personas sin conocimientos especializados, lo cual simplifica la comunicación y el análisis de los resultados. Esta característica es especialmente relevante para promover la conciencia y la participación de todos los actores involucrados en el proceso de mejora energética.

Para llevar a cabo las proyecciones y la planificación de la toma de decisiones en el contexto de una planta cementera, se ha decidido emplear el modelo

LEAP (Long-range Energy Alternatives Planning) que se refiere a un Modelo de Energías Integradas Asociadas. Estos modelos se utilizan para desarrollar prospectivas energéticas que contemplen diversos escenarios posibles.

Hasta la fecha, el modelo LEAP ha sido comúnmente utilizado en la elaboración de balances energéticos a nivel nacional o local. Sin embargo, en este proyecto se plantea un novedoso uso que consiste en llevar a cabo la aplicación de dicho modelo a escala industrial.

LEAP toma como referencia un año base, y estiman los posibles escenarios mediante la contabilidad de flujos energéticos y la simulación de modelos aproximados. Con estos resultados se puede llegar a tener un análisis individual de los procesos de producción que facilite la identificación de las etapas más ineficientes, hallar el motivo del alto consumo energético y aplicar las respectivas correcciones. Este modelo es reconocido por fácil manejo de datos, flexible e intuitivo. Su ámbito de operación incluye: demanda, emisiones GHG, análisis de costo-beneficio social entre otros [6].

## 1.2 Estado del Arte

En América Latina, los mercados de cemento han experimentado una transformación significativa impulsada por la presencia de grupos internacionales como Holcim, Lafarge y Cemex. Dichas empresas han realizado adquisiciones estratégicas en la región, consolidando su posición y generando una importante capacidad de producción. Actualmente, representan aproximadamente el 48 % del mercado de América Latina, y su participación continúa en aumento [7].

Este proceso de globalización ha llevado a una modernización e integración vertical en los mercados cementeros latinoamericanos [7]. Esta industria al igual que otras, han ido buscando que el modelo de gestión de energía sea sustentable, minimizando el impacto que el uso de los combustibles fósiles tiene en el medio ambiente.

Mientras que en un contexto más cercano y a nivel local, el informe del Balance Energético Nacional del 2022 del Ministerio de Minas y Energía revela un incremento del 21,6 % en la demanda energética del país desde el 2012 hasta el 2022, alcanzando los 99,9 millones de barriles equivalentes de petróleo (BEP). Este aumento sustancial refleja la creciente necesidad y dependencia de la energía en la nación durante la última década [8].

A lo largo de la última década, el sector transporte se mantiene como el mayor consumidor, con un promedio de 41,9 millones de BEP, seguido por

el sector industrial (que ha crecido significativamente) con 16,6 millones de BEP. En el 2022, la demanda total creció un 5,7 %, siendo el sector transporte el principal contribuyente con un 49,1 %, seguido por el sector industrial con un 17,9 % [8], tal como se muestra en la Figura 1.

Balance Nacional 2022: Nivel de participación

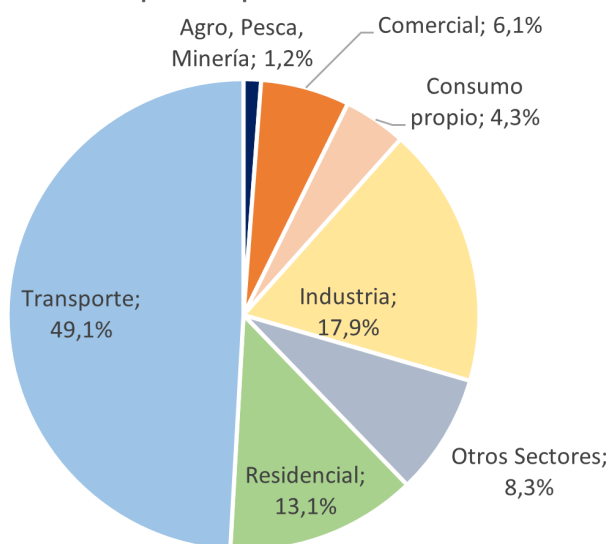


Figura 1: Balance Nacional 2022

El sector industrial se distingue por su marcado empleo de electricidad como fuente principal de energía, representando el 40,8 % del consumo total. Esta inclinación hacia la electricidad sugiere un enfoque hacia fuentes más limpias y eficientes en las distintas empresas manufactureras. Asimismo, el diésel oil ocupa un lugar relevante en el mix energético industrial, contribuyendo con un 27,3 % al consumo total, señalando la persistencia de fuentes convencionales en este sector [8], esto se puede representar en la Figura 2.

## Tipos de energía empleados en la industria

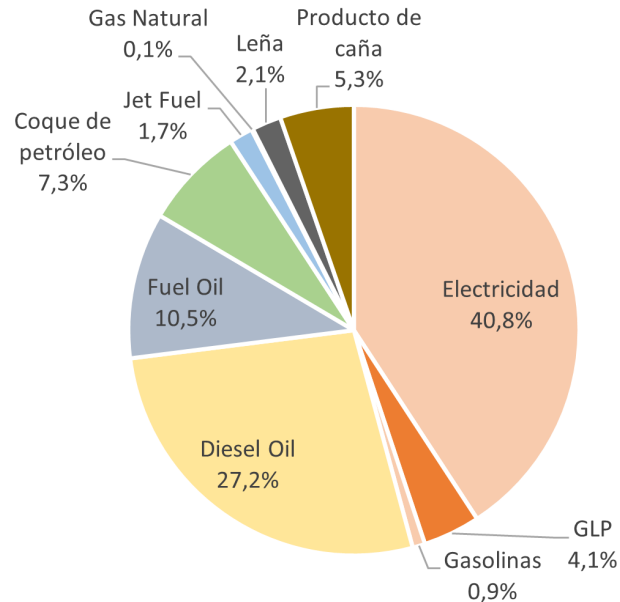


Figura 2: Tipos de energía empleados en la industria

Estos datos resaltan la necesidad de analizar minuciosamente las preferencias energéticas en el sector industrial, subrayando la importancia de implementar estrategias que impulsen la transición hacia fuentes más sostenibles y respetuosas con el medio ambiente. La identificación de patrones y la promoción de prácticas energéticas responsables se revelan como imperativos para avanzar hacia un futuro más sostenible y eficiente en el uso de recursos.

Con el marco contextual expuesto a nivel nacional, se confirma que el 17,9% del consumo energético pertenece al sector industrial, permitiendo identificar a las principales empresas cementeras que lideran este aspecto a nivel país. En este escenario, la participación de la industria cementera en Ecuador está encabezada por Holcim Ecuador, ostentando un 62% del total, seguido por Lafarge Cementos con un 23%. En tercer lugar se encuentra Cementos Guapán, con una contribución del 8%, y finalmente, Cemento Chimborazo con un 7%. Este análisis resalta la importancia de estas empresas en el consumo energético industrial del país [9].

Estos datos permanecieron sin variaciones significativas durante algunos años hasta que los dos primeros productores a nivel nacional se fusionaron. Por ello, LafargeHolcim tiene el 85 % de la producción en el país, lo que refiere a una mayor necesidad de incorporar estrategias de negocio y administrativas que desde la eficiencia energética puedan remediar la contaminación ambiental, así como optimizar recursos económicos con el ahorro en el uso de energía eléctrica.

En la industria cementera el consumo energético representa una parte significativa de los costos de producción, superando el 40 % del costo total [7]. Además, el sector tiene un impacto ambiental considerable debido a la generación de gases de efecto invernadero, especialmente el  $CO_2$ , tanto por la combustión como por la descomposición de las materias primas [7]. Es decir, las empresas enfrentan un desafío importante en términos de competitividad y sostenibilidad, lo que resalta la necesidad de gestionar el ahorro energético y mejorar los procesos de fabricación.

De allí que tanto el balance de energía y el diagrama de Sankey se han convertido en una herramienta de gran relevancia en la búsqueda de mejoras en la eficiencia energética de los sistemas industriales [10]. Su importancia trasciende al punto de ser reconocidos por organizaciones internacionales, entre ellas la ISO 14000, que trata sobre los "Sistemas de Gestión Medioambiental, Especificaciones y Directrices para su Utilización" [11]. El diagrama Sankey es una de las herramientas más utilizadas para modelación de flujos energéticos, debido a la fácil visualización de la participación de varios procesos, por lo que se ha sugerido emplear en este proyecto.

En cuanto a los modelos disponibles para analizar escenarios específicos, es fundamental considerar un enfoque socio-económico y energético bien fundamentado. Estos modelos proporcionan la capacidad de determinar las demandas y requisitos energéticos mediante el uso de herramientas como modelos econométricos o modelos analíticos. Un ejemplo destacado de este tipo de modelos es el LEAP (Longrange Energy Alternatives Planning) o MAED.

El modelo LEAP ha demostrado su eficacia en diversos estudios energéticos, desempeñando un papel crucial en el proceso de planificación y evaluación de escenarios. Este enfoque aborda distintos niveles de medición de la energía, ya sea en términos netos o útiles. Su aplicación se ha extendido en la investigación energética, consolidándose como una valiosa herramienta para la toma de decisiones informadas [12].

El modelo LEAP ha sido empleado en diversos estudios y proyectos relacionados con la planificación y evaluación de escenarios energéticos. Algunos ejemplos concretos se puede visualizar en la tabla 1:

<b>Modelo LEAP en Investigaciones Energéticas y Planificación Sostenible</b>	
<b>Estudios</b>	<b>Aplicación / Objetivo</b>
Estudio técnico - económico de la gasificación de Ecuador	En resumen este proyecto busca un modelo para gasificar el sistema de generación eléctrico y el sistema de transporte por carretera de Ecuador [13]
Estudio de avances de integración energética en Mendoza de vehículo eléctricos sistemas de generación distribuida. Modelo LEAP	En este trabajo presenta herramientas para la evaluar el sector energético y tomar decisiones basadas en escenarios a largo plazo. Se enfoca en integrar vehículos eléctricos y generación distribuida con paneles solares en sistemas energéticos regionales, como el de Mendoza [14].
Prospectiva de Auto generación en el Ecuador mediante uso de Modelo LEAP.	Este trabajo propone una metodología para estimar el potencial de auto generación eléctrica utilizando paneles fotovoltaicos instalados en los edificios a nivel nacional [15]

Tabla 1: Aplicaciones del Modelo LEAP [1].

### 1.3 Alcance

Con este estudio se pretende identificar los procesos primordiales de una planta cementera, en este caso Induatenas, y dar seguimiento a las entradas y salidas de energía que en la actualidad se ocupe. Una vez posicionados los distintos recursos energéticos, se pueden realizar las proyecciones que más convenga a la planta. El Grupo Graiman se destaca por su participación activa en el análisis de optimización energética, la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y la mejora continua de sus procesos, consolidándolo como una empresa competente y comprometida.

## **1.4 Objetivos**

### **1.4.1 Objetivo General**

Realizar un balance energético con el fin de identificar oportunidades de mejora y reducir las pérdidas en el proceso de operación de la planta Induatenas S.A.

### **1.4.2 Objetivos Específicos**

- Evaluar los flujos energéticos dentro de la planta Induatenas S.A. para identificar posibles ahorros.
- Obtener un diagrama de Sankey para la representación de los flujos de energía de ingreso y destino en la planta Induatenas S.A.
- Evaluar propuestas de mejoras y de automatización que incrementen la eficiencia de los sistemas de consumo energético.

## 2 Marco Teórico

El balance energético, es definido como una contabilidad de todos los flujos energéticos, orientado a establecer la relación de la energía con variables de tipo económico, social, político, ambiental o tecnológico. El balance energético expresa todas las formas de energía en una unidad común de conteo y muestra las relaciones entre las entradas y salidas de energía y sus transformaciones en los diferentes sectores pertenecientes a un lugar [16]. La energía por sectores permite detectar cómo influye en la demanda en los distintos procesos y actuar en consecuencia.

Las demandas del mercado obligan a las empresas cementeras en Ecuador a fabricar productos de alta resistencia para destacar competitivamente. Esto implica mejorar la molienda, alcanzar mayor finura con considerables consumos eléctricos. El objetivo es reducir costos de producción, operación y mantenimiento, y al mismo tiempo, lograr las resistencias necesarias [16].

En el contexto de Induatenas S.A, su equipo administrativo y productivo muestra interés en la gestión energética, especialmente debido a la escasez de información sobre su consumo. Este estudio busca explorar una metodología basada en indicadores para el seguimiento, medición y mejora de procesos, con el fin de respaldar el monitoreo del desempeño energético.

Es fundamental tener en cuenta que las empresas cementeras, al igual que otras manufactureras, se clasifican según sus actividades económicas de la Clasificación Industrial Internacional Uniforme (**CIIU**). La CIIU proporciona una estructura basada en insumo, procesos y tecnología de producción, así como en las características de los productos. Estos datos se recopilan y divulgan en un formato diseñado para análisis económico, toma de decisiones y formulación de políticas[17].

Según un estudio realizado por la Manufacturing Energy Consumption Survey (**MECS**), se llevó a cabo un exhaustivo mapeo de las emisiones de gases de efecto invernadero (**GEI**) asociadas con la generación y el uso final de energía. Como resultado de este análisis, se identificaron las huellas de carbono de 15 sectores de fabricación, incluyendo la industria cementera. Estos sectores, al constituir un conjunto único en la manufactura, representan el 95 % del uso de energía primaria en la fabricación de Estados Unidos [18].

La industria del cemento consume gran cantidad de energía, cada tonelada de cemento producido necesita de unos 73 a 130 kilos de petróleo o



de combustible equivalente, según la variedad del cemento o el proceso de fabricación utilizado [7].

La OLADE menciona que para el sector industrial la energía se clasifica en fuentes térmicas, empleadas en calderas, hornos y quemadores, y en fuerza motriz, utilizada para accionar molinos, bombas, bandas transportadoras e iluminación, entre otros. Esta energía se traduce principalmente en unidades de electricidad o combustibles para el funcionamiento de equipos [17].

En el sector de la construcción (CIIU división 45), se los principales combustibles son diésel, fuel oil y bunker. A su vez el Manual de Estadísticas OLADE, presenta importantes factores de conversión de unidades básicas y derivadas en el Sistema Internacional (SI) y otros factores de unidades al realizar análisis energéticos.

La OLADE, en su manual de Balances Energéticos, enfatiza la relevancia de desglosar el consumo final en el sector industrial utilizando los términos de BEEU (Balance Energía – Energía Útil). Esto facilita la estimación de la demanda industrial, influenciada por dos factores críticos: la tecnología de fabricación y su eficiencia práctica. Este enfoque posibilita una evaluación precisa de la demanda en el sector industrial [17].

- **Energía Primaria:** Se entiende por Energía Primaria a las distintas fuentes de energía tal como se obtienen en la naturaleza, ya sea: en forma directa como en el caso de la energía hidráulica o solar, la leña y otros combustibles vegetales; o después de un proceso de extracción como el petróleo, carbón minera, geotermia, etc [17].
- **Energía Secundaria:** Energía Secundaria: Se denomina Energía Secundaria a los diferentes productos energéticos que provienen de los distintos centros de transformación y cuyo destino son los diversos sectores del consumo y/u otros centros de transformación [17].

La eficiencia global, también llamada eficiencia es la multiplicación entre *Eficiencia de Producción* y *Eficiencia de uso*. Al multiplicar la energía final por esta eficiencia global, se obtiene la demanda de energía útil, y la discrepancia entre ambas cifras refleja las pérdidas [17].

El reto que se presenta al querer determinar eficiencias es la falta de información preexistente. En el Manual OLADE, se especifica que por lo general solo se conoce o se puede aproximar la eficiencia de producción, que se trabaja con datos de catálogos de fabricación, datos de placa establecidos en un

estándar.

La eficiencia de uso solo puede estimarse mediante mediciones, siendo preferibles las mediciones tanto de entrada como de salida en la zona de estudio o mediante equipos específicos. Sin embargo, este método presenta desafíos significativos, como la disponibilidad de equipos de medición, la accesibilidad a la empresa, entre otros factores importantes que deben tenerse en cuenta.[17].

Sin embargo, para lograr una mayor precisión, la única vía es a través de *Auditorías Energéticas* que desvelen los parámetros termodinámicos específicos de las plantas industriales. No obstante, se requiere generalizar estadísticamente estos valores sobre una muestra representativa de industrias. Trabajar con eficiencias medidas se torna esencial al realizar diagnósticos, elaborar portafolios de opciones de mejora y desarrollar planes de eficiencia energética.

En la sección metodológica se detallará el procedimiento para capturar información y datos. Es importante señalar que al optar por la desagregación de Insumos energéticos, se debe considerar también los Insumos Energéticos Netos (IEN). Por lo tanto, es esencial contar con datos generales de la empresa, como la materia prima empleada, la cantidad de turnos, los períodos de mantenimiento, diagramas de flujos generales de procesos, así como los registros de compras de energía y sus respectivos precios.

## 2.1 Proceso de producción de cemento

El proceso de producción del cemento tiene varias etapas para llegar al producto terminado y ser vendido, sin embargo cabe recalcar que actualmente la cementera Induatenas S.A compra directamente el clinker. El clinker es un material esencial en la producción de cemento. Es el resultado de calcinar una mezcla de piedra caliza y arcilla a altas temperatura en un horno. Los procesos que se evitan al comprar clinker serían; molienda de crudo, homogenización, precalcinación, clinkerización y enfriamiento.

En el siguiente diagrama se presenta el orden de los procesos.

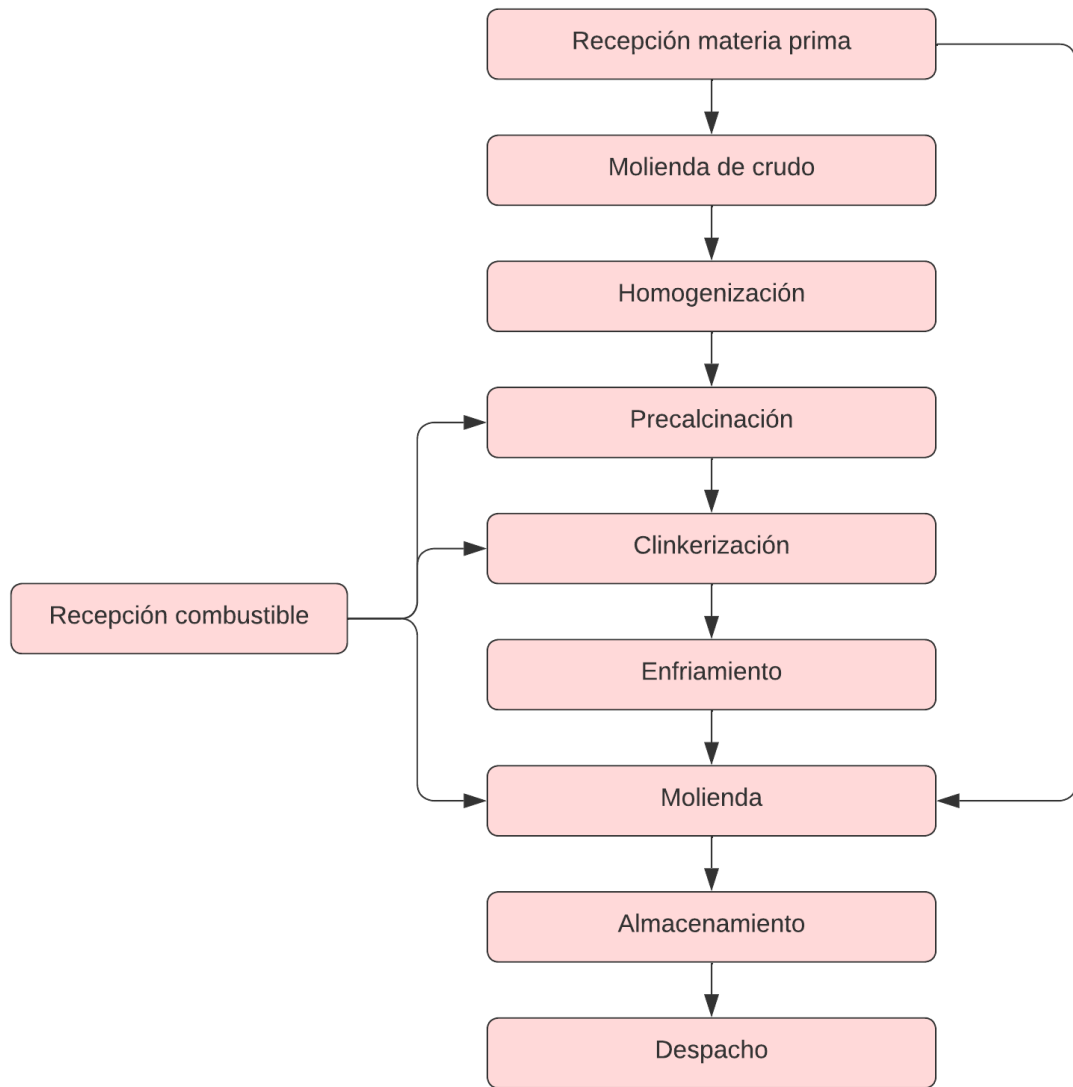


Figura 3: Proceso de producción del cemento

- **Materias Primas**

La producción de cemento tiene como las principales materias primas:

clinker, caliza, yeso y puzolana, estos materiales pasan por un proceso de molienda en este caso donde interviene el molino vertical y los calentadores para la calcinación, en esta sección la materia prima esta almacenada en tolvas que se controlan por dosificaciones según el tipo de cemento a producir.

- **Molino Vertical**

La fabricación de cemento inicia con la distribución de materias primas mediante un sistema de bandas equipadas con celdas de carga, las cuales pesan y transportan los materiales a la siguiente etapa, conocida como dosificación. Una vez que la materia prima ingresa al molino vertical, este comienza con el proceso de molienda, mediante tres rodillos que trituran el material y forma una capa en la mesa, luego se inyecta aire caliente al proceso por medio del generador de gases el cual ayuda al transporte de material y por medio del filtro principal se extrae el particulado de este proceso.

Dependiendo del tipo de cemento a producir se calibra la potencia del filtro principal y la velocidad del separador dinámico. En caso de que el material que no cumpla con la especificaciones antes mencionadas, se reintegra al proceso. Mientras que el material que si cumple con los parámetros necesarios de calidad pasan al filtro principal, donde se procede con las etapas de transporte y el material ya procesado llega a los silos de cemento, es decir que, se almacena para la etapa final de ensacado [19].

## 2.2 Sistema de control SCADA - Cementera Induatenas

Cabe recalcar que, actualmente la planta Induatenas cuenta con dos servidores SCADA:

- TIA PORTAL
- ABB

Estos dos software, son herramientas de control de procesos, cada una opera con su lenguaje de programación y maneja variables diferentes, al igual que equipos de medición de diferentes marcas. Por ejemplo, TIA PORTAL, desarrollado por Siemens y por su parte ABB que utiliza el sistema 800xA.

Estos sistemas de control son herramientas para monitorizar el proceso, principalmente las zonas de materias primas, molino vertical, almacenamiento en los silos de cemento y la parte más importante, la ensacadora. Como la intención es conocer indicadores reales de la empresa en cuanto a variación de los consumos energéticos, comparar niveles de producción, es necesario conocer entornos de desarrollo, lenguajes de programación y configuraciones específicas de cada herramienta.

- **TIA PORTAL**

Tía Portal está diseñado para la programación y configuración de sistemas de automatización industrial, incluyendo controladores lógicos programables (PLC), interfaces entre Hombre-Maquina (HMI), dispositivos de entradas y salidas(I/O), entre otros componentes de automatización.

Hace algunos años atrás los programadores de automatización tenían que utilizar diferentes programas y herramientas independientes para programar y configurar los distintos dispositivos que se podían encontrar en un sistema de control. Esto implicaba aprender y manejar múltiples códigos y productos. Mediante la introducción de TIA PORTAL, Siemens proporcionó una solución integrada y unificada, dando así la programación y configuración de PLC's, HMI's, I/O's en un único entorno de desarrollo. Además por utilizar una única plataforma, se establece conexiones más sólidas dando así mayor coherencia y compatibilidad entre los diferentes dispositivos de automatización [20].

- **ABB** El sistema SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) de ABB (Asea Brown Boveri) desempeña un papel crucial al controlar y supervisar diversos procesos industriales en tiempo real. La solución SCADA de ABB facilita a las industrias y empresas el monitoreo de sistemas de control y la adquisición de datos en tiempo real. Además, ABB ofrece sistemas integrales de supervisión y adquisición de datos (SCADA) que proporcionan una visión completa de las operaciones, permitiendo la toma de decisiones fundamentadas basadas en datos[21].

El sistema SCADA de ABB presenta una ventaja sustancial al disponer de una base de datos que almacena los parámetros clave de los equipos principales en la planta. Los datos de tendencias, tales como intensidad, tensión y potencia activa, resultan fundamentales para realizar un

análisis detallado del rendimiento de cada equipo vinculado al proceso mencionado anteriormente.

### 2.3 Diagramas Sankey

En general se puede decir que el diagrama Sankey es aquel que muestra la distribución cuantitativa de todos los flujos de energía que entran y salen de un sistema. Este modelo Sankey es una herramienta bastante útil para representar una visión general de los resultados de diferentes tipos de energía que se utilizan en una planta, además se puede realizar seguimiento transformación de la energía en el proceso productivo, incluyendo los equipos que intervienen en las etapas de molienda y despacho [22].

El manual para la elaboración de diagramas de Sankey considera que la información a usar, deben ser sometida a varios pasos preliminares como; a depuración de la base de datos y creación de tablas dinámicas, permiten calcular los valores de los flujos, diferenciando así cuales van a corresponder a nodos y cuales representan ramificaciones del proceso.

Para la representación de los flujos energéticos se considera lo siguiente:

- **Energía disponible:** Es la energía aprovechable y resulta de la suma algebraica de los procesos de producción, intercambios previos al consumo, variación de inventarios y la energía no es provechada.
- **Transformación:** es la energía consumida en los centros de transformación para obtener las formas de energía secundaria que tienen las características específicas para su consumo.
- **Consumo:** En el sector energético incluye el consumo propio y las pérdidas dentro de éste [23].

### 2.4 Modelo LEAP

LEAP (Long-range Energy Alternatives Planning System) utiliza flujos energéticos para crear escenarios y examinar situaciones. Es una herramienta flexible e intuitiva que permite analizar la demanda, emisiones y costo-beneficio. Su objetivo principal es analizar la demanda de sectores y subsectores, considerar variables de stock y calcular efectos medioambientales. Es importante destacar que este modelo también contribuye al desarrollo del Diagrama de

Sankey, el cual es de crucial importancia para la elaboración de una prospectiva sobre la eficiencia energética futura [6].

LEAP es ampliamente utilizado en más de 140 países y sirve también para comunicarse con la IPCC. Permite trabajar con un alto nivel de agregación, aprovechar proyecciones econométricas y analizar el impacto de la incorporación de energías renovables no convencionales en el sector eléctrico. También permite estimar las emisiones de gases de efecto invernadero y las reducciones esperadas de políticas de eficiencia energética y promoción de energías renovables no convencionales de manera directa [12].

El modelo LEAP opera en dos niveles conceptuales distintos para su modelado. En el primero, realiza automáticamente cálculos estándar de energía, emisiones y beneficios económicos. En el segundo nivel, los usuarios pueden ingresar datos variables en el tiempo o crear modelos complejos usando expresiones similares a las de una hoja de cálculo. Esto posibilita la integración de enfoques econométricos y de simulación dentro de los marcos contables y de optimización de LEAP [24]

A continuación, se exponen algunas consideraciones al aplicar el software del modelo LEAP:

- **Tipos de Análisis:**

Como se ha mencionado previamente, este modelo realiza análisis en varios ámbitos estratégicos incluyendo análisis de demanda, análisis de transformación, análisis de recursos y análisis ambientales. De manera que LEAP puede combinar varias conclusiones y llevar a cabo análisis de Planificación Energética Integrada (IEP). En forma opcional, también permite crear inventarios y escenarios para efectos del sector no energético.

- **Estructuras de Datos:** El modelo LEAP utiliza una estructura arborescente para organizar las principales estructuras de datos de demanda, transformación y recursos. Cada tipo de rama en el árbol está representado por un ícono diferente. Junto con el árbol, también se utilizan bases de datos de soporte transversales, tales como fuentes, efectos, unidades y referencias.

- **Análisis de escenarios:** Los escenarios representan proyecciones sistemáticas de la evolución probable de los sistemas energéticos en un contexto demográfico y socio-económico específico, bajo un conjunto determinado de condiciones de política, a lo largo del tiempo.

- **Interfase de Usuario:** La interfaz de usuario del sistema LEAP cuenta con una pantalla principal que incluye una Barra de Vistas a la izquierda, un menú principal y una barra de herramientas principal en la parte superior para acceder a las funciones más importantes del programa. El diseño del resto de la pantalla variará según la versión del software aplicado [25].

LEAP, un modelo versátil, realiza análisis estratégicos en áreas como Demanda, Transformación, Recursos y Ambientales, permitiendo la Planificación Energética Integrada (IEP) con la opción de crear inventarios y escenarios no energéticos. Su estructura de datos arborescente organiza eficientemente Demanda, Transformación y Recursos, con bases de datos transversales. Los escenarios en LEAP proyectan la evolución de sistemas energéticos en contextos demográficos y socio económico específicos bajo diversas condiciones políticas a lo largo del tiempo. Su interfaz de usuario, con Barra de Vistas, menú principal y barra de herramientas, facilita el acceso a las funciones clave, adaptándose al diseño según la versión del software aplicado[26].



### 3 Metodología

Basado en la aplicación del método científico en el ámbito de la ingeniería eléctrica con el objetivo de mejorar la eficiencia en una planta productora de cemento, este estudio de investigación destaca la importancia de mantener la claridad y coherencia en cada fase del proceso metodológico. En este contexto, la Guía de Auditorías Energéticas específica para la industria cementera establece un proceso de cuatro etapas: preparación, planificación, ejecución y reporte.

Cada una de estas etapas comprende actividades con objetivos particulares que se alinean con los objetivos generales de la Auditoría Energética (AE). Adaptando estas etapas del Ministerio de Energía, Agencia de Sostenibilidad Energética, se ha integrado el Modelo de Análisis de Energía (LEAP) en el presente proyecto de investigación, especialmente en las fases de análisis y reporte, lo cual brinda un valor agregado en las proyecciones. Es importante señalar que la flexibilidad de cada etapa permite ajustar el orden o incluir actividades adicionales según las necesidades específicas de este estudio [27].

Sin embargo, es común que en la metodología se descuide el enfoque y alcance del estudio, lo que puede afectar la eficacia del proceso. Por ello, es esencial mantener una visión clara y enfocada en los objetivos establecidos. Cada etapa del proceso metodológico debe estar meticulosamente diseñada para abordar aspectos específicos del análisis energético en la planta de cemento, asegurando así que se cumplan los objetivos del estudio.

Las actividades requeridas para cumplir los objetivos de esta investigación se resumen en la Figura 4:

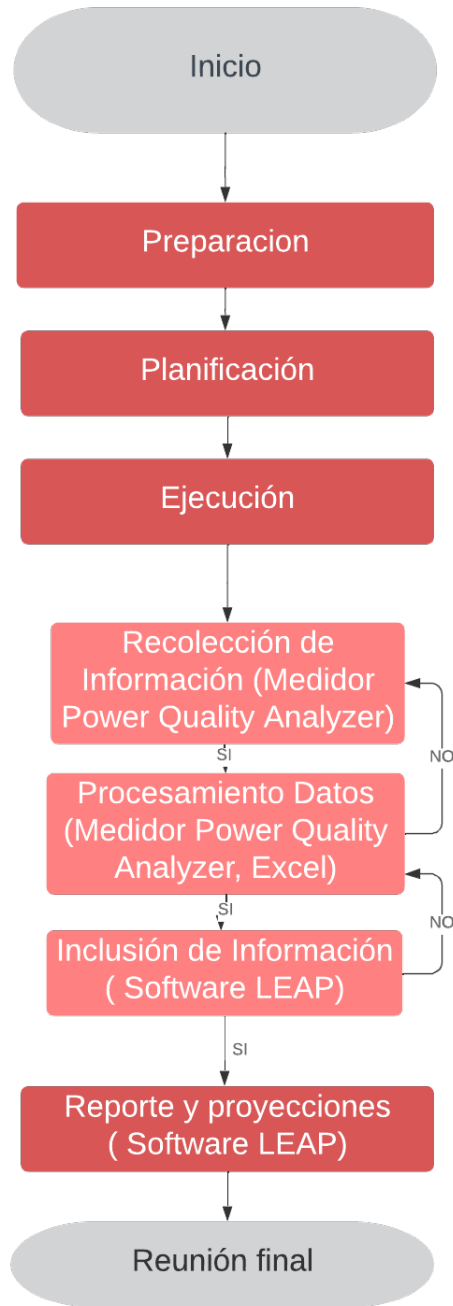


Figura 4: Diagrama de flujo de la metodología

### 3.1 Preparación

En la etapa de preparación se debe evaluar el estado de gestión actual de la empresa, y con ello se puede delimitar y definir el alcance y la profundidad de de la propuesta.

### 3.2 Planificación

En este punto se realizan las planificaciones de reuniones y cronograma. Se coordina principalmente las fechas en las que se puede realizar las visitas a campo y la disposición del acceso a los cuartos de control en cuales se encuentran las cargas. [1].

De acuerdo al nivel de complejidad de las instalaciones que se identificó con el departamento eléctrico de la planta de cemento, se debe definir si es necesario realizar un recorrido inicial en las instalaciones con el objetivo de evaluar aspectos técnicos que influyan en el área de estudio [27].

El recorrido inicial permite:

1. Establecer contacto entre el personal de apoyo de la planta, y en este caso estudiantes.
2. Reconocer la zonificación, sistemas y/o equipos que serán auditados.
3. Realizar consultas generales de horarios y operación de los sistemas.
4. Identificar ciclos representativos de operación de los sistemas.
5. Identificación de equipos de difícil acceso como equipos en altura, espacios confinados, entre otros.
6. Identificar instrumentación de medición existente.
7. Evaluar las condiciones para instalar equipos de medición.
8. Identificar las áreas de acceso restringido para gestionar permisos de acceso.

### 3.3 Ejecución

#### 3.3.1 Recolección de información básica e inventarios generales de la planta

Una vez que las partes interesadas dan paso a recorridos, se realiza una encuesta para tener datos generales de abastecimiento u oferta interna que es la cantidad de energía, primaria o secundaria, que tiene como destino el consumo intermedio en los centros de transformación y/o el consumo neto total del sistema.

Con el modelo de encuestas propuesto por la OLADE, Anexo ?? y entrevistas se tiene la siguiente información:

- **Periodo de producción** Horas por día, Días por semana, Semanas al año
- **Materias primas utilizadas:** Las principales utilizadas para la obtención de los productos elaborados al año.
- **Compra mensual de Electricidad:** La encuesta dada por la OLADE sugiere que se recopilen datos al menos de los últimos tres años.
- **Consumo de Combustibles:** En esta sección no se incluye el combustible del transporte.
- **Medidas de uso eficiente y renovables:** Lo que se pretende en esta sección es averiguar si la empresa ha implementado o tiene la intención de implementar alguna medida de uso de eficiencia de la energía y uso de renovables (menos de 3 años).

La encuesta sobre el consumo y usos de la energía del sector industrial tiene fines estadísticos y garantiza la identificación del establecimiento. Dado que hoy en día la cementera Induatenas SA. compra clinker, es necesario analizar los procesos que están actualmente trabajando. Los procesos que se encuentran activos son molienda de cemento, almacenamiento, ensacado y despacho granel.

Además se procede a realizar una entrevista al Supervisor General de Producción y Supervisor de Mantenimiento Eléctrico, debido a su conocimiento en el procesos de producción y dinámica de los trabajos que se realizan día

a día en la planta. Con esta información no solo se tienen datos reales y actuales del proceso, sino que también revela las necesidades y aspiraciones de la empresa a futuro. Con lo que se puede realizar proyecciones más precisas y anticipar escenarios futuros con mayor exactitud [17].

Se puede decir que la recolección de información de los flujos energéticos que ingresan a los procesos claves de producción, son tomados de un sistema de control SCADA en algunos casos, y en otros equipos que aun no se ha implementado TCS o lecturas al servidor SCADA, requieren de mediciones de varios días ( tres días por equipo) para comprender las tendencias de consumo que tiene ese equipo de transformación.

La toma de datos se realiza mediante el Analizador de Calidad de Energía UNI-T UT285C con el cual se pueden observar varios parámetros de control e indicadores como formas de onda en tiempo real, gráficos de barras de relación armónica de corriente-voltaje; captura dinámicamente los cambios instantáneos de voltaje-corriente, monitorea la corriente de arranque, supervisa los parámetros de potencia, y genera el gráfico de tendencia para datos de prueba a largo plazo .

### **3.3.2 Procesamiento de datos.**

En esta etapa se requiere que los datos extraídos sean coherentes, fiables y que tengan consistencia dimensional en unidades homogéneas de energía. En México, la Ley Federal sobre Metrología y Normalización establece al Joule (J) como la unidad de medida de la energía y por el orden de magnitud de las cantidades [23].

Para el procesamiento de datos se puede considerar las diferentes formas de energía que entran o salen del sistema deben estar referidas a un mismo periodo de tiempo y expresadas en las mismas unidades, consiguiendo cuantificar las fuentes de energía y sus procesos de producción, intercambio, transformación, pérdidas y consumo dentro de los límites territoriales de la entidad [23].

### 3.3.3 Inclusión de Información

Cuando los datos estén consolidados y depurados en una hoja de cálculo, será necesario presentarlos en tablas dinámicas para obtener los flujos energéticos. Los datos de las mediciones de los principales equipos se procesan con la ayuda del programa del Power Quality System.

En esta sección se hace hincapié en la necesidad de contar con datos actualizados, históricos y proyecciones, así como la posibilidad de complementar estos datos con estimaciones propias y fuentes de información internacionales, para mayor fiabilidad de los resultados. El modelo LEAP permite adaptarse a diversas fuentes de datos para ofrecer un análisis energético integral y preciso.

En cuanto a la integración del diagrama Sankey se pueden usar programas de diseño de diagramas de flujo. En este caso se ha optado por el programa LEAP que a su vez sirve para realizar los análisis y proyecciones posteriormente. Este programa permite trabajar en excel, exportar o importar tablas dinámicas de cálculo con sus gráficas correspondientes.

Para estructurar el diagrama se necesita crear todos los nodos (proceso), de acuerdo con la información de las tablas dinámicas, ahora tiene que definir qué fluye entre un nodo y el siguiente [28]. El programa facilita lecturas generales para recrear un diagrama Sankey, siguiendo pautas para lograr el balance deseado. Además, permite guardar diagramas como plantillas para mantener consistencia en nuevas creaciones [28].

Dentro de programa Leap al mostrar los resultados con etiquetas o ramas seleccionadas para la leyenda del gráfico, codificará el árbol por colores, los mismos que se utilizan en el gráfico. Lo cual hace que sea fácil ver cómo los resultados del gráfico se corresponden con las ramas del árbol (o las etiquetas establecidas en esas ramas). Estos datos se estructuran jerárquicamente en varias ramas, incluyendo:

- Categorías: para la organización de los datos.
- Tecnología: proporciona información acerca de los procesos de conversión de energía.
- Supuestos clave: relacionados con las variables independientes.
- Tipos de combustibles: abarca los diferentes combustibles utilizados.

- Cargas ambientales: referentes a los distintos contaminantes presentes.

### 3.3.4 Escenarios

El análisis de escenarios constituye el núcleo de LEAP, donde estos son proyecciones sistemáticas de la probable evolución futura de sistemas energéticos a lo largo del tiempo. Esto se realiza en un contexto demográfico y socioeconómico específico y bajo un conjunto determinado de condiciones de política [28].

El Administrador de Escenarios en LEAP está dividido en:

1. Lista Jerárquica de Escenarios: A la izquierda, muestra una lista de escenarios organizados en una estructura jerárquica. Permite editar y agregar escenarios, así como seleccionar qué resultados mostrar en diferentes vistas.
2. Propiedades de los Escenarios: En la parte superior derecha, se pueden editar diversas propiedades de cada escenario:
  - Abreviatura: Nombre corto para el escenario.
  - GWP: Valores de Potencial de Calentamiento Global (GWP) para cálculos de emisiones.
  - Incluir en Informes MACC: Selección de escenarios para informes especiales.

Estas herramientas permiten una gestión eficiente de los escenarios en LEAP, facilitando la exploración y evaluación de diferentes configuraciones y condiciones futuras en el sistema energético [24].

## 3.4 Reportes

### 3.4.1 Reporte de proyecciones de mejora en eficiencia energética

En la etapa de reporte se presenta un resumen de los análisis y proyecciones de cada sistema o proceso, la medida energética correspondiente a cada uno y el comentario o sugerencia. En otras palabras, se puede decir que una vez identificados los puntos débiles del sistema se puede realizar la toma de

decisiones respecto al comportamiento energético de los diferentes sistemas de en el proceso.

De aquí que al desarrollar la estrategia en una empresa se tenga que profundizar en el entendimiento del cliente y sus necesidades, y para responder a ello, hay que revisar críticamente los procesos de la compañía. A partir de aquí se deben establecer prioridades y trabajar para desarrollar nuevos conceptos, procesos, productos y servicios que atiendan y excedan las expectativas del cliente[29].

## 4 Resultados

A continuación, se detalla en la tabla 2 de forma minuciosa la identificación del establecimiento en el que se llevó a cabo la encuesta sobre consumo y usos de la energía del sector eléctrico, tomado como referencia la iniciativa propuesta por el Ministerio de Energías y Minas en colaboración con la Organización Latinoamericana y la Fundación Bariloche [17].

<b>Identificación del Establecimiento</b>	
<b>Nombre o razón social</b>	Induatenas S.A Grupo Graiman
<b>Actividad principal</b>	Fabricación de cemento
<b>Actividad secundaria</b>	Ninguna
<b>Nombre del informante</b>	Rafael Mauricio Llivicuscha
<b>Email</b>	<a href="mailto:rcabrerall@graiman.com">rcabrerall@graiman.com</a>
<b>Cargo</b>	Supervisor de producción

Tabla 2: Identificación del establecimiento

Mientras que en la Tabla 3 se identifica un estándar de las horas de trabajo en los procesos de producción y despacho. Estos datos varían dependiendo la demanda que exista, sea alta o baja.

	<b>Periodo de producción</b>	
	<b>Alta</b>	<b>Baja</b>
Horas por día	16,76	12,18
Días por semana	117,32	85,28

Tabla 3: Régimen de producción de la planta



Para la tabla 4, se detalla la cantidad de energía eléctrica en (kW h) y combustible (Galones) en el año 2023 que Induatenas ha consumido.

Mes	Electricidad Mensual (kWh)	Combustible Mensual (Galones)
Enero	923200	24343
Febrero	737400	19506
Marzo	829700	20280
Abril	814100	25664
Mayo	802300	23808,7
Junio	770600	30992,4
Julio	788300	28291
Agosto	744756,53	29585
Septiembre	748062,53	23784
Octubre	752996,267	19699
Noviembre	754320	19380
Diciembre	1024967,18	0
<b>Total</b>	<b>9690702,51</b>	<b>26533,1</b>

Tabla 4: Recursos Energéticos Induatenas en 2023

Los resultados de las horas de operación de los equipos y las horas de parada se obtienen gracias al sistema Scada en el cual se ha podido tabular, y depurar las horas de operación por mes como se muestra en la Tabla 5.

AÑO BASE 2023			
Mes	Hrs. del mes	Hrs. de Parada	Hrs. de trabajo
Enero	744	224,41	519,59
Febrero	672	285,02	386,98
Marzo	744	366,31	377,69
Abril	720	299,73	420,27
Mayo	744	347,11	396,89
Junio	720	305,79	414,21
Julio	744	296,48	447,52
Agosto	744	298,24	445,76
Septiembre	720	319,84	400,16
Octubre	744	304,13	439,87
Noviembre	720	297,2	422,8

Diciembre	744	275,41	468,59
<b>Total de horas</b>	<b>8760</b>	<b>3619,67</b>	<b>5140,33</b>

Tabla 5: Horas de operación año base 2023

Las estimaciones de las potencias de los equipos principales se llevaron a cabo utilizando el equipo Power Quality Analyzer. Las mediciones en campo se extendieron por un período de dos a tres días, dependiendo de la actividad operativa de los equipos, cuando no se lograba una consistencia o un periodo continuo se tenía que repetir el proceso, con el fin de garantizar una mayor fiabilidad en los resultados obtenidos. Las mediciones de los equipos; Ventilador de tiro, Tornillo sin fin, Elevador, Compresor, Ensacadora y Paletizadora se pueden visualizar [6.2](#).

Mientras que para Molino Vertical la potencia promedio en un mes es aproximadamente de 852 kW y para el Separador dinámico 84,60 kW igualmente tomando como referencia un mes de tendencia. Es importante destacar que los datos mencionados provienen del sistema SCADA (cuartos de control de la planta Induatenas).

El Molino Vertical y el Separador Dinámico son los únicos equipos que cuentan con sistemas integrados de almacenamiento de datos, al igual que los medidores principales. Los demás equipos carecen de esta capacidad, lo que impide la recopilación y análisis de parámetros importantes, como los picos de tensión u otros datos relevantes para el estudio de tendencias.

Los cálculos del consumo energético anual de cada equipo, se obtienen gracias a las potencias resultados de las mediciones y las horas de operación registradas, estos valores son esenciales para la construcción del año base en un análisis energético.

Con lo cual se proporciona una referencia sólida del año base, para evaluar el rendimiento energético de los equipos bajo condiciones normales de operación. Los resultados se presentan en la siguiente tabla [6](#).

<b>MEDICIONES DE LOS EQUIPOS</b>		
<b>Equipos</b>	<b>Medición</b>	<b>Unidades</b>
Molino vertical	852	kW
Separador dinámico	84,60	kW

Ventilador de tiro	407,85	kW
Tornillo sin fin	2,40	kW
Elevador	2,62	kW
Compresor	77,33	kW
Ensacadora	80,82	kW
Paletizadora	2,39	kW
<b>Total trabajo al año</b>	<b>5140,33</b>	<b>Horas</b>
<b>Total de energía</b>	<b>7761980,031</b>	<b>kWh</b>

Tabla 6: Nivel de participación equipos principales

En la Tabla 7 se incluyen los equipos con mayor importancia en los procesos de molienda de cemento, ensacado y despacho. Los equipos auxiliares como bandas transportadoras, filtros, sensores y otros, no tienen mayor consumo energético, y por ende se ha generalizado su participación, el porcentaje de los equipos auxiliares sería la diferencia entre la energía total calculada menos la energía de todos los equipos.

<b>NIVEL DE PARTICIPACIÓN EN PORCENTAJES</b>			
<b>Área</b>	<b>Equipos</b>	<b>Porcentaje de Equipo</b>	<b>Porcentaje de Área</b>
Molino Vertical	Motor de molino	100	51,6
Equipos Principales	Separador dinámico	12,86	38,8
	Ventilador de tiro	61,98	
	Tornillo sin fin	0,37	
	Elevador	0,40	
	Compresor	11,75	
	Ensacadora	12,28	
	Paletizadora	0,36	
Equipos Auxiliares	Equipos complementarios	100	9,6
<b>Total de porcentaje dentro de la planta</b>			<b>100</b>

Tabla 7: Evaluación del aporte de energía eléctrica de equipos en la planta Induatenas S.A

Para la siguiente Figura 5 se puede apreciar claramente los niveles de participación específicamente de energía eléctrica, en donde la sección del

Molino Vertical corresponde a 51,7%, mientras que los equipos principales tienen el 38,8% de participación y los equipos auxiliares u otros, corresponde al 9,6% del restante.

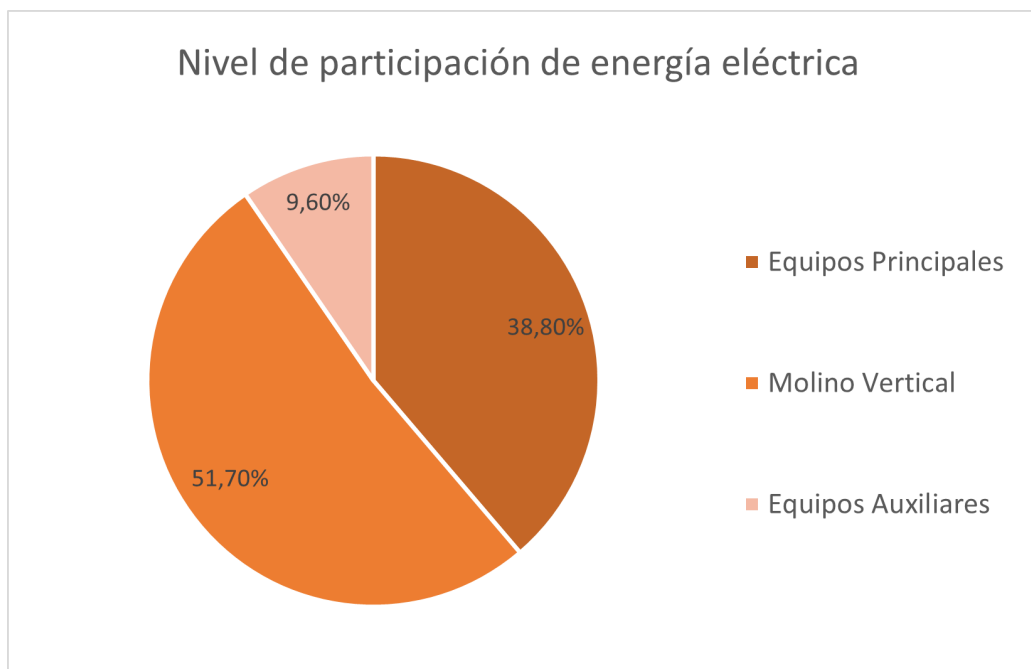


Figura 5: Nivel de participación por área

La Figura 6 muestra la participación desagregada en el año base, de la sección de los equipos principales, proporcionada por el LEAP. Este análisis considera el nivel de participación de cada sección y lo relaciona con cada equipo de la siguiente manera:

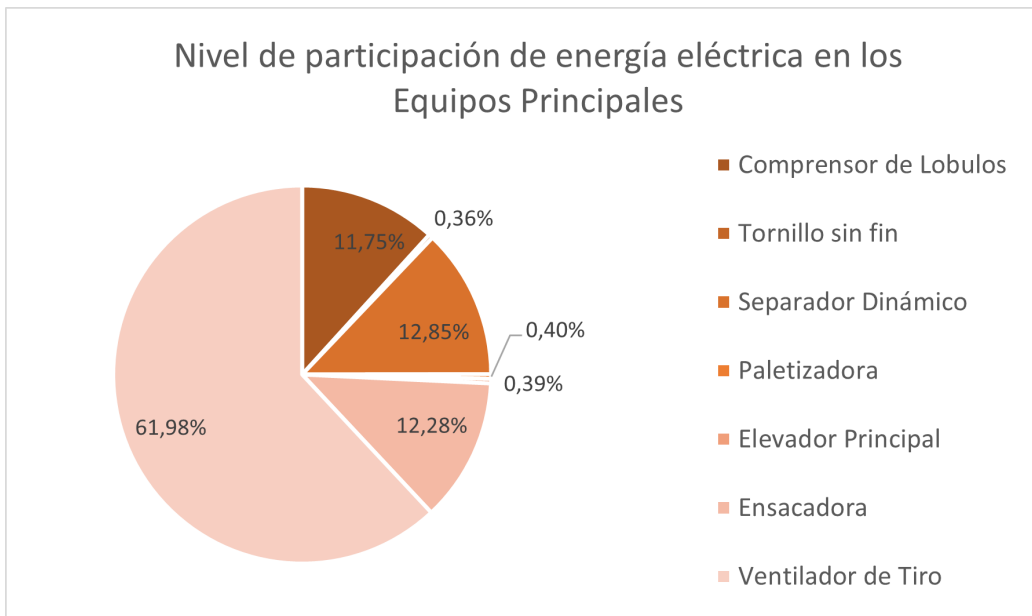


Figura 6: Nivel de participación de los equipos

Mientras que el combustible es destinado solo al área de molienda, en donde se encuentran dos sub secciones, el motor del molino vertical y los calentadores. El motor del Molino Vertical tiene un consumo importante de electricidad, mientras que los calentadores funcionan por medio de combustible.

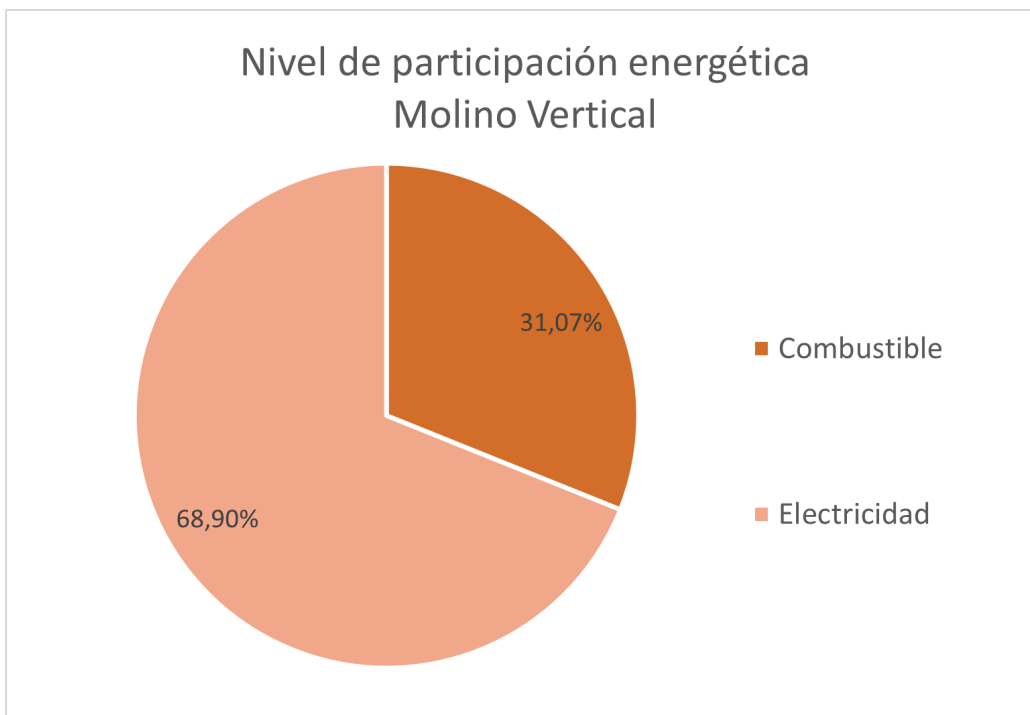


Figura 7: Nivel de participación energético Molino Vertical

Con la estructura previa, se tiene la siguiente distribución energética incluyendo el combustible en el proceso del molienda de cemento. En el diagrama Sankey que se presenta a continuación en la figura 8 se puede apreciar en la primera ramificación los tipos de energía que consume la planta, mientras que en el segundo nivel se identifica como se distribuye la energía eléctrica para los equipos principales y los equipos auxiliares.

En la figura 9 se presenta la tabla del Balance Energético que proporciona directamente el programa LEAP pasándolo todo a las mismas unidades energéticas en este caso está expresado en millones de unidades térmicas.

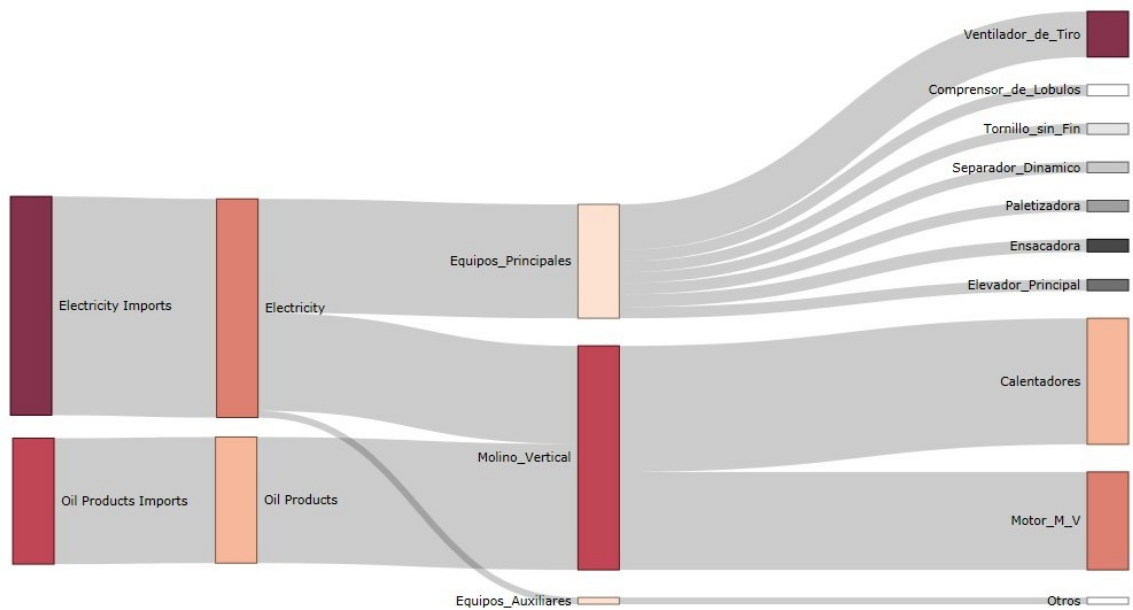


Figura 8: Diagrama de Sankey

Energy Balance for Area "Induatenas_S.A."			
Escenario: Línea_Base, Year: 2025, Units: Miles de millones Therm (US)			
	Electricity	Oil Products	Total
Producción	-	-	-
Importaciones	33,65	15,16750000	48,81750000
Exportaciones	-0,00000047	-0,00000095	-0,00000142
Oferta Total Primaria	33,65	15,16750000	48,81750000
Transformación Total	-	-	-
Equipos principales	9,095568136	0	9,095568136
Ventilador	7,98	-	7,98
Separador	0,40200000	-	0,40200000
Paletizadora	0,00037173	-	0,00037173
Tornillo	0,00035981	-	0,00035981
Elevador	0,00043660	-	0,00043660
Ensacadora	0,39740000	-	0,39740000
Compresor	0,31500000	-	0,31500000
Molino Vertical	33,65	15,16750000	48,81750000
Motor_M_V	33,65	-	33,65000000
Calentadores	-	15,16750000	15,16750000
Equipos auxiliares	4,356	-	4,35600000
Equipos auxiliares	4,356	-	4,35600000
<b>Demanda Total</b>	<b>47,10156814</b>	<b>15,16750000</b>	<b>62,26906814</b>
Unmet Requirements	-	-	-

Figura 9: Balance Energético

Para la parte final se presentan los diferentes escenarios que se pueden

dar en la industria por diferentes razones, ya sea económicas por las decisiones políticas, sociales como el crecimiento de la demanda y ambientales de acuerdo con las normas ISO a las que debe adaptarse una planta cementera.

Para el primer escenario se ha considerado realizar una estimación de la tasa de crecimiento en base a la producción de Induatenas en los últimos 10 años. Este valor de la tasa de crecimiento se coloca en un escenario dentro del programa LEAP, y este realiza un crecimiento progresivo cada año. En la Figura 10 se puede apreciar cómo se incrementa un 2,56 % la demanda de acuerdo al nivel de participación de cada área, tomando como referencia el año base. Mientras que el crecimiento porcentual está expresado por toneladas métricas (producción de cemento) en un periodo de diez años.

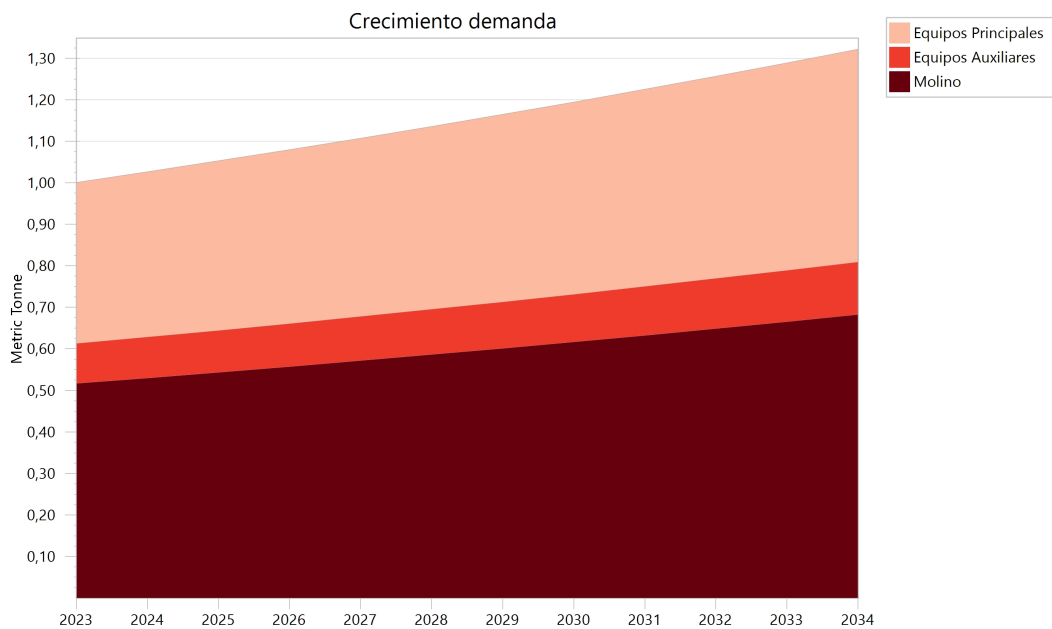


Figura 10: Tasa de crecimiento demanda

Cuando la tasa de crecimiento sube 2,56 % al año, se puede ver la equivalencia del consumo de energía expresado en gigajoule en la tabla 8. Los valores que presentan una magnitud considerable, se aprecian en los equipos



principales y en el área de Molino Vertical.

<b>Crecimiento de Demanda</b>		
<b>Año</b>	<b>Equipos Principales</b>	<b>Molino Vertical</b>
2023	5,2	100
2024	5,4	105,5
2025	5,7	111
2026	6,0	116,8
2027	6,3	122,8
2028	6,7	129,2
2029	7,0	135,9
2030	7,4	143
2031	7,8	150,4
2032	8,2	166,4
2033	8,6	175
2034	9,0	184,1
2035	9,5	193,6
2036	10,0	203,6
2037	10,5	214,2
2038	11,0	225,3
2039	11,6	237

Tabla 8: Crecimiento demanda

Es importante tener en cuenta que, a medida que la demanda de energía aumenta, el consumo energético también experimenta un incremento proporcional. Este aumento en el consumo energético conlleva a un crecimiento en los costos asociados. Por tanto, en la Figura 11 se presenta el aumento anual en relación al año base, proporcionando una visión clara de cómo los costos en dólares (U.S) están directamente relacionados con el incremento en el consumo de energía.

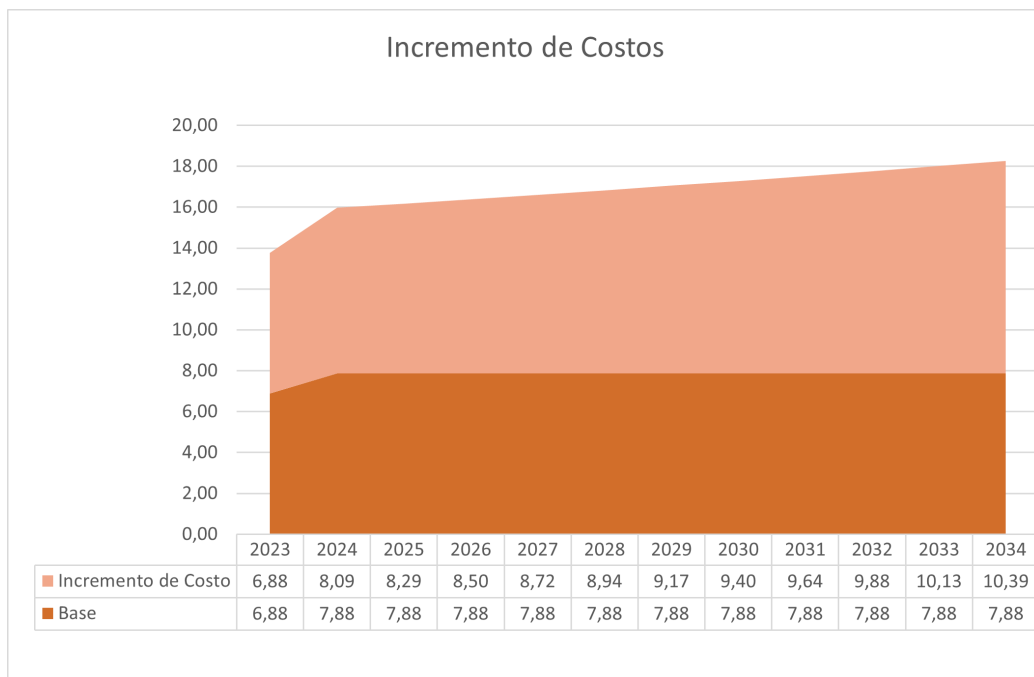


Figura 11: Incremento de costo

Considerando el escenario del nivel tecnológico, se ha establecido una línea base para la eficiencia del motor del molino vertical, la cual se sitúa en un 94,30% cuando su factor de potencia es de 0,8. Sin embargo, en caso de que el factor de potencia disminuya a 0,7, ya sea por razones constructivas o externas al motor, la eficiencia caerá al 91,80% [30].

Por lo que en la figura 12 y la tabla 9 se compara el consumo energético cuando existe una mayor eficiencia en la línea base, y para el escenario se ha planteado un decrecimiento de la eficiencia para el año 2025 puede apreciar como crece el consumo energético.

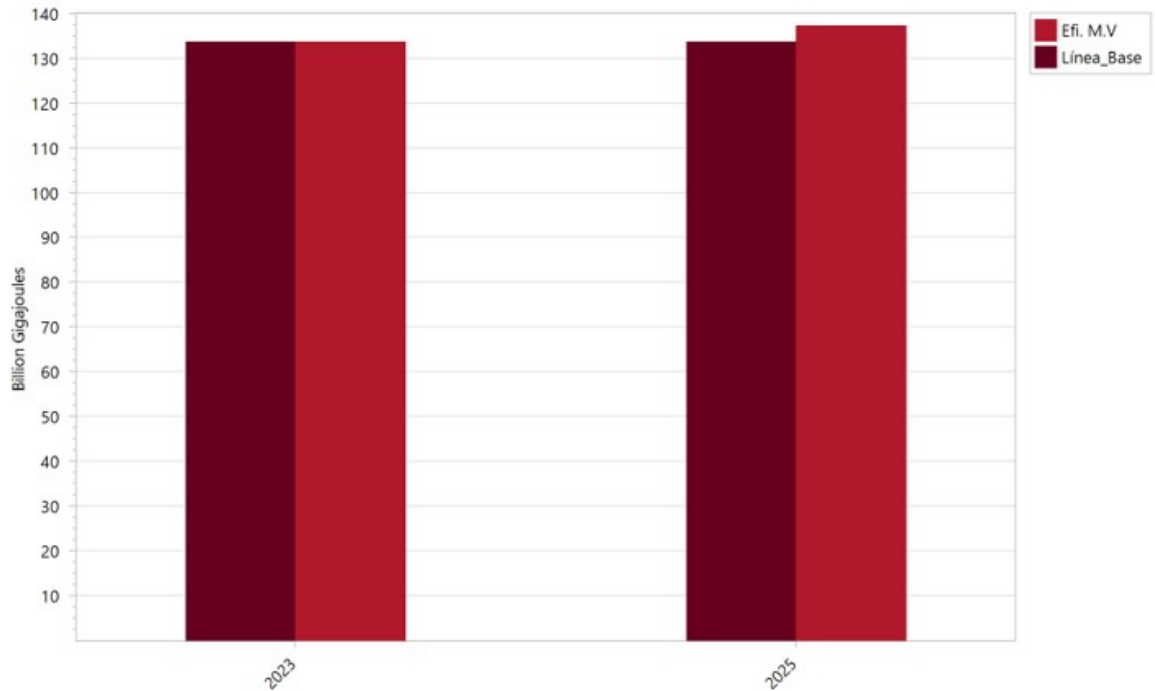


Figura 12: Eficiencia Molino Vertical

Eficiencia Molino Vertical		
Año	2023	2025
Efi. M.V.	133,71032	137,35167
Línea Base	133,71032	133,71032

Tabla 9: Eficiencia Molino Vertical

Dentro de la prospectiva energética que se ha planteado realizar comparaciones de emisiones de CO<sub>2</sub> por tonelada métrica de cemento producido teniendo presente el año base. LEAP da la facilidad de transformar las emisiones del tipo de energía que se esté utilizando. En la línea base, se puede seleccionar el tipo tecnología con intensidad energética que se desee aplicar (electricidad, gasolina, gas natural, diesel, GLP, fuel oli, etc), en este caso, en el año 2023 la planta consumió combustible líquidos derivado del petróleo

más conocido como fuel oil. En esta sección se tiene declarado un valor fijo para las emisiones de CO2 por tonelada métrica, dando por entendido que lo seguirá usando como combustible para los calentadores durante los 10 años próximos. Para plantear una comparación, se crea un escenario igual, sin embargo ahora se crea una nueva tecnología con Gas Natural con características similares a la de la línea base. Dentro del nivel de actividad se usa la función interpolar para exprin esar que el Gas Natural entrara en funcionamiento en 2025, este año puede ser modificado de acuerdo a conveniencia de la planta. A continuación se muestra como la línea base no experimenta reducciones de las emisiones de CO2 mientras que en el apartado de combustibles, se ve una reducción del 17,64 % para el del año 2034.

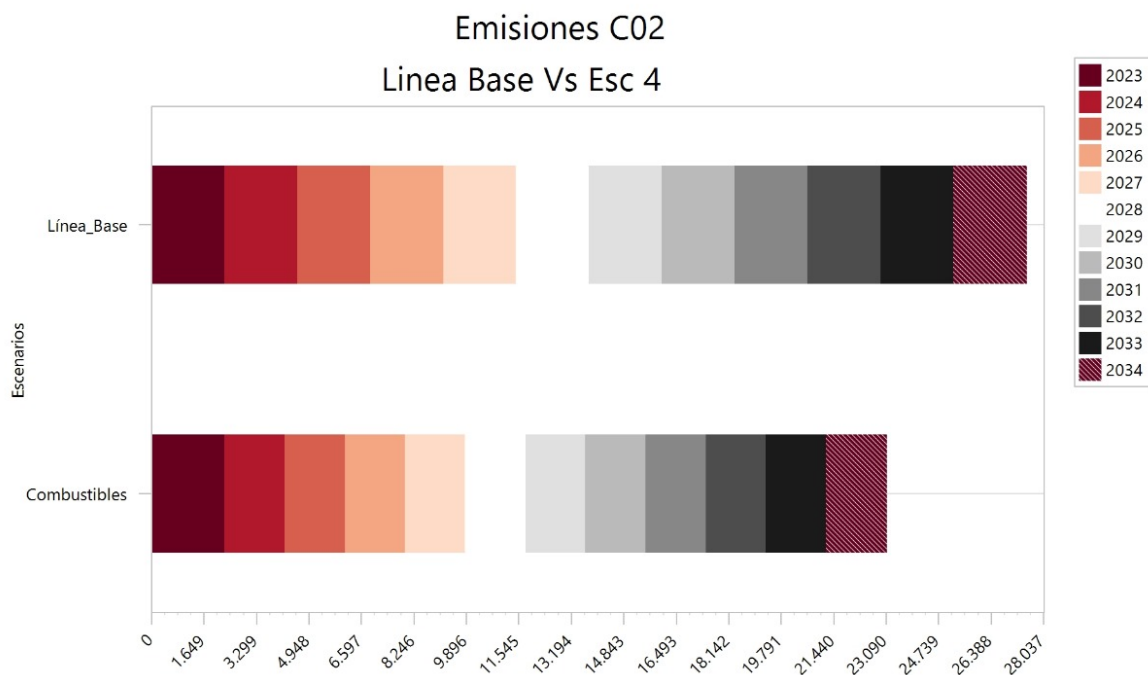


Figura 13: Eficiencia Molino Vertical

## 5 Discusión

Los desafíos y soluciones identificados en el balance energético tienen varias aristas. El proyecto ha demostrado cómo la aplicación del modelo LEAP y los diagramas de Sankey pueden ser herramientas efectivas para identificar oportunidades de mejora y reducir pérdidas energéticas en los procesos industriales.

En primer lugar, se destaca la capacidad del modelo LEAP para proyectar escenarios energéticos y planificar decisiones estratégicas en plantas cementeras. La utilización de este modelo ha permitido una comprensión profunda de los patrones de consumo energético y ha facilitado la identificación de áreas críticas de mejora.

Por otro lado, los diagramas de Sankey han proporcionado una representación visual clara de los flujos de energía en los sistemas industriales, lo que ha permitido identificar fácilmente los puntos críticos de consumo, tales como el Molino Vertical, el Ventilador de tiro y los Calentadores, que destacan por su elevado consumo energético. Estas áreas son prioritarias en términos de intervención y optimización.

El diagrama Sankey se distingue además por su capacidad para involucrar a todas las partes interesadas en el proceso de mejora energética. Tanto el personal técnico como el administrativo participan en la toma de decisiones, lo que promueve una perspectiva integral y colaborativa en la implementación de medidas de eficiencia energética.

Además, se discuten las implicaciones ambientales de mejorar la eficiencia energética en la industria del cemento. Se reconoce que estos esfuerzos no solo pueden conducir a una reducción de costos operativos, sino también a una disminución significativa de las emisiones de gases de efecto invernadero. Estas mejoras en la eficiencia energética se alinean con las normativas y tendencias globales hacia la sostenibilidad, lo que refuerza la posición de las empresas del sector en el mercado y fortalece su compromiso con la responsabilidad ambiental. Como se ha planteado antes, el cambio de combustibles puede ser un camino para la sostenibilidad ambiental, sin embargo se debería tener en cuenta otras variables, como el costo del gas natural si se se reemplaza por el combustible actual (fuel oil).

## 6 Conclusiones y Recomendaciones

### 6.1 Conclusiones

El análisis de participación desagregada en la sección de los equipos principales, realizado mediante el diagrama de Sankey, ha revelado que el Molino Vertical y el ventilador de tiro son los equipos con mayor consumo de energía eléctrica, en la planta Induatenas S.A. Esta información es crucial para dirigir futuras acciones de optimización hacia estos equipos y áreas específicas. Por otro lado se ha logrado identificar la relación energética entre combustible y electricidad en el área de Molino Vertical. Dando como resultado una participación del 75 % de la energía total a la parte eléctrica y el 24,35 % combustibles.

Teniendo en cuenta estos indicadores, se hace hincapié en las perspectivas energéticas incluyen la comparación de emisiones de CO<sub>2</sub> por tonelada métrica de cemento producido, teniendo en cuenta diferentes tecnologías y combustibles. La incorporación de Gas Natural como combustible alternativo para los calentadores muestra el potencial para reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> hasta un 17 % proyectándose al año 2034, y mejorar la sostenibilidad ambiental de la planta.

Por otro lado, gracias al modelo LEAP se ha observado que, a medida que la demanda de energía aumenta, el consumo energético también se incrementa proporcionalmente. Este aumento en el consumo de energía se traduce en un crecimiento de los costos operativos.

En el escenario de nivel tecnológico, se ha identificado que la eficiencia del motor del molino vertical juega un papel crucial en el consumo energético. Cuando la eficiencia del motor disminuye, como se simula en el escenario propuesto para el año 2025, se observa un aumento significativo en el consumo energético.

Cabe recalcar que los escenarios posibles son infinitos, sin embargo se resalta la importancia de aplicar de la mejor manera los modelos de planificación como el LEAP para la industria, para estrategias de mejora.

### 6.2 Recomendaciones

Se recomienda enfocar los esfuerzos de optimización energética en los equipos identificados como los mayores consumidores, como el molino vertical y el ventilador de tiro, con el objetivo de mejorar su eficiencia y reducir los costos

asociados.

Es esencial monitorear de cerca el crecimiento de la demanda de energía y desarrollar estrategias para gestionar eficazmente este aumento, implementando medidas de eficiencia energética y control de costos.

Se sugiere llevar a cabo un mantenimiento regular de los equipos y sistemas energéticos para garantizar su funcionamiento óptimo y maximizar su vida útil, lo que contribuirá a reducir las pérdidas energéticas y mejorar la eficiencia operativa.

Considerando la importancia de la eficiencia del motor del molino vertical, se recomienda realizar estudios detallados para identificar posibles mejoras en su rendimiento y aplicar las correcciones necesarias para mantener una eficiencia óptima.

La incorporación de Gas Natural como combustible alternativo para los calentadores presenta una oportunidad para reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> y mejorar la sostenibilidad ambiental de la planta. Se recomienda evaluar detalladamente los beneficios y desafíos asociados con esta transición y desarrollar un plan de implementación adecuado debido a que los costos de los combustibles varían.

# Anexos

MEDICIONES DE TORNILLO SIN FIN	
Machine setup informatio Column1	_1
Machine time,24/1/23 13	8 13,
Reacitve value calculation,Without harmonic,	
Electrial connection,3-phase 5-wire,	
Trend record information,	
Filename,TOR2,	
Start time,24/01/23 12	8 00,
Stop time,24/01/23 13	8 00,
Record Period,1min,	
Monitor parameter,HZ,Vrms,Vthd,Vcf,PST,Arms,Atlc	
Harmonic parameter 0,Vh00,Vh01,Vh02,Vh03,Vh04	
Harmonic parameter 1,Ah00,Ah01,Ah02,Ah03,Ah04	
Electrial connection,3-phase 5-wire,	
Trend record waveform curve in current parameter,	
Potencia total calculada 2,40 kW	
Time, ,L1,L2,L3,?,	
24/01/23 12	8 00,,-817,7W,-704,8W,-872,1W,-2,394kW,
24/01/23 12	9 00,,-819,4W,-711,1W,-876,6W,-2,407kW,
24/01/23 12	10 00,,-816,0W,-708,6W,-872,8W,-2,397kW,
24/01/23 12	11 00,,-730,3W,-719,3W,-960,5W,-2,410kW,
24/01/23 12	12 00,,-721,8W,-715,6W,-951,2W,-2,389kW,
24/01/23 12	13 00,,-720,1W,-712,3W,-952,7W,-2,385kW,
24/01/23 12	14 00,,-717,4W,-710,3W,-942,2W,-2,370kW,
24/01/23 12	15 00,,-718,8W,-710,4W,-941,9W,-2,371kW,
24/01/23 12	16 00,,-731,5W,-717,7W,-953,7W,-2,403kW,
24/01/23 12	17 00,,-725,7W,-713,8W,-947,1W,-2,387kW, ...

Figura 14: Mediciones de Tornillo sin Fin



MEDICIONES PALETIZADORA	
Machine setup information,	
Machine time,24/1/12 17:11:44,	
Reacitve value calculation,Without harmonic,	
Electrial connection,3-phase 5-wire,	
Trend record information,	
Filename,ABC,	
Start time,24/01/12 14:48:00,	
Stop time,24/01/12 15:48:00,	
Record Period,20s,	
Monitor parameter	
Electrial connection,3-phase 5-wire,	
Potencia total calculada	2,39 kW
Trend record waveform curve in current parameter,	
Time, ,L1,L2,L3,?,	
24/01/12 14:48:00,	
24/01/12 14:48:20,	
24/01/12 14:48:40,	
24/01/12 14:49:00, ,2,757kW,2,821kW,3,002kW,8,580kW,	
24/01/12 14:49:20, ,4,696kW,4,828kW,4,874kW,14,40kW,	
24/01/12 14:49:40, ,3,958kW,4,059kW,4,135kW,12,15kW,	
24/01/12 14:50:00, ,1,855kW,1,879kW,2,005kW,5,739kW,	
24/01/12 14:50:20, ,1,809kW,1,872kW,2,027kW,5,707kW,	
24/01/12 14:50:40, ,1,359kW,1,376kW,1,495kW,4,230kW,	
24/01/12 14:51:00, ,1,659kW,1,771kW,1,912kW,5,342kW,	
24/01/12 14:51:20, ,1,423kW,1,460kW,1,600kW,4,483kW,	
24/01/12 14:51:40, ,1,633kW,1,704kW,1,878kW,5,214kW,	
24/01/12 14:52:00, ,1,996kW,2,120kW,2,283kW,6,398kW,	
24/01/12 14:52:20, ,1,563kW,1,574kW,1,718kW,4,85 ...	

Figura 15: Mediciones de Paletizadora

MEDICIONES ELEVADOR			
Column1	Column2	Column3	Column4
	Machine	setup	
Machine	time,23/12/26 17	10:32:21,	
Reacitve	value	calculation,Without	
Electrial	connection,3-phas	4-wire,	
Trend	record	information,	
Start	time,23/12/26 16		50
Stop	time,24/12/26 16		50
Record	Period,5min,		
Trend	record	waveform	
		Potencia total calculada	2,62 kW
Time,	,L1,L2,L3,?,		
23/12/2026	16:50:00	00, ,731,8W,784,1W,861,2W,2,377kW,	
23/12/2026	16:50:20	20, ,701,7W,0,00W,781,6W,1,483kW,	
23/12/2026	16:50:40	40, ,807,0W,0,00W,829,5W,1,636kW,	
23/12/2026	16:51:00	00, ,772,2W,0,00W,838,0W,1,610kW,	
23/12/2026	16:51:20	20, ,749,0W,0,00W,813,3W,1,562kW,	
23/12/2026	16:51:40	40, ,804,7W,0,00W,856,0W,1,661kW,	
23/12/2026	16:52:00	00, ,796,0W,769,7W,837,7W,2,403kW,	
23/12/2026	16:52:20	20, ,845,9W,835,7W,855,8W,2,537kW,	
23/12/2026	16:52:40	40, ,797,0W,785,2W,834,3W,2,416kW,	
23/12/2026	16:53:00	00, ,828,7W,831,7W,911,4W,2,572kW,	
23/12/2026	16:53:20	20, ,659,9W,691,4W,759,5W,2,111kW,	
23/12/2026	16:53:40	40, ,776,5W,797,2W,842,9W,2,417kW,	
23/12/2026	16:54:00	00, ,720,2W,719,3W,800,5W,2,240kW,	
23/12/2026	16:54:20	20, ,770,6W,763,0W,850,4W,2,384kW,	
23/12/2026	16:54:40	40, ,770,8W,753,3W,828,6W,2,353kW,	...

Figura 16: Mediciones del Elevador

MEDICIONES COMPRESOR		
Machine setup information, Column1		1
Machine time,23/12/26 18		55 53,
Reactive value calculation,Without harmonic,		
Electrial connection,3-phase 5-wire,		
Trend record information,		
Filename,MVCO,		
Start time,23/12/26 18		3 00,
Stop time,24/12/26 18		3 00,
Record Period,5min,		
Monitor parameter,HZ,Vrms,Vthd,Vcf,PST,Arms,Athd,Acf,KF		
Harmonic parameter 0,Vh00,Vh01,Vh02,Vh03,Vh04,Vh05,V		
Harmonic parameter 1,Ah00,Ah01,Ah02,Ah03,Ah04,Ah05,A		
Electrial connection,3-phase 5-wire,		
	Potencia total claculada	77,33 kW
Trend record waveform curve in current parameter,		
Time, ,L1,L2,L3,?,		
23/12/26 18	3 00, ,25,32kW,28,74kW,26,00kW,80,05kW,	
23/12/26 18	3 20, ,15,36kW,18,18kW,16,06kW,49,61kW,	
23/12/26 18	3 40, ,25,21kW,28,56kW,25,98kW,79,75kW,	
23/12/26 18	4 00, ,17,01kW,19,82kW,17,67kW,54,50kW,	
23/12/26 18	4 20, ,25,25kW,28,54kW,26,02kW,79,81kW,	
23/12/26 18	4 40, ,25,32kW,28,61kW,26,09kW,80,02kW,	
23/12/26 18	5 00, ,25,32kW,28,59kW,26,04kW,79,94kW,	
23/12/26 18	5 20, ,25,37kW,28,57kW,26,02kW,79,96kW,	
23/12/26 18	5 40, ,25,16kW,28,30kW,25,81kW,79,27kW,	
23/12/26 18	6 00, ,25,29kW,28,43kW,26,01kW,79,73kW,	
23/12/26 18	6 20, ,15,22kW,17,83kW,15,83kW,48,89kW,	
23/12/26 18	6 40, ,25,31kW,28,50kW,26,06kW,79,88kW,	
23/12/26 18	7 00, ,15,85kW,18,57kW,16,57kW,50,98kW,	...

Figura 17: Mediciones del Compresor

MEDICIONES ENSACADORA	
Machine setup information Column1	_1
Machine time,24/1/12 17	11 44,
Reactive value calculation,Without harmonic,	
Electrial connection,3-phase 5-wire,	
Trend record information,	
Filename,ABC,	
Start time,24/01/12 14	48 00,
Stop time,24/01/12 15	48 00,
Record Period,20s,	
Monitor parameter,HZ,Vrms,Vthd,Vcf,PST,Arms,Athd,/,	
Harmonic parameter 0,Vh00,Vh01,Vh02,Vh03,Vh04,V	
Harmonic parameter 1,Ah00,Ah01,Ah02,Ah03,Ah04,A	
Electrial connection,3-phase 5-wire,	
Trend record waveform curve in current parameter,	
Potencia total calculada 80,82 kW	
Time, ,L1,L2,L3,?,	
24/01/12 14	48 00, ,1,021kW,0,00W,1,658kW,2,679kW,
24/01/12 14	48 20, ,985,9W,0,00W,1,166kW,2,152kW,
24/01/12 14	48 40, ,1,489kW,0,00W,1,638kW,3,127kW,
24/01/12 14	49 00, ,2,757kW,2,821kW,3,002kW,8,580kW,
24/01/12 14	49 20, ,4,696kW,4,828kW,4,874kW,14,40kW,
24/01/12 14	49 40, ,3,958kW,4,059kW,4,135kW,12,15kW,
24/01/12 14	50 00, ,1,855kW,1,879kW,2,005kW,5,739kW,
24/01/12 14	50 20, ,1,809kW,1,872kW,2,027kW,5,707kW,
24/01/12 14	50 40, ,1,359kW,1,376kW,1,495kW,4,230kW,
24/01/12 14	51 00, ,1,659kW,1,771kW,1,912kW,5,342kW, ...

Figura 18: Mediciones de Ensacadora

MEDICIONES VENTILADOR DE TIRO	
Machine setup information,	Columna2
Machine time,24/1/12 17	Columna1
Reacitve value calculation,Without harmonic,	
Electrial connection,3-phase 5-wire,	
Trend record information,	
Filename,ABC,	
Start time,24/01/12 14	
Stop time,24/01/12 15	
	Potencia total calculada 407,85 kW
Trend record waveform curve ir POTENCI ACTIVA KW	
Time, ,L1,L2,L3,?,	
24/01/12 14	399,73
24/01/12 14	400,98
24/01/12 14	399,87
24/01/12 14	403,45
24/01/12 14	400,98
24/01/12 14	399,81
24/01/12 14	403,45
24/01/12 14	401,52
24/01/12 14	402,97
24/01/12 14	398
24/01/12 14	404,48
24/01/12 14	404,05
24/01/12 14	401,52
24/01/12 14	407,34 ...

Figura 19: Mediciones de Ventilador de Tiro



Figura 20: Mediciones en campo



Figura 21: Mediciones en campo

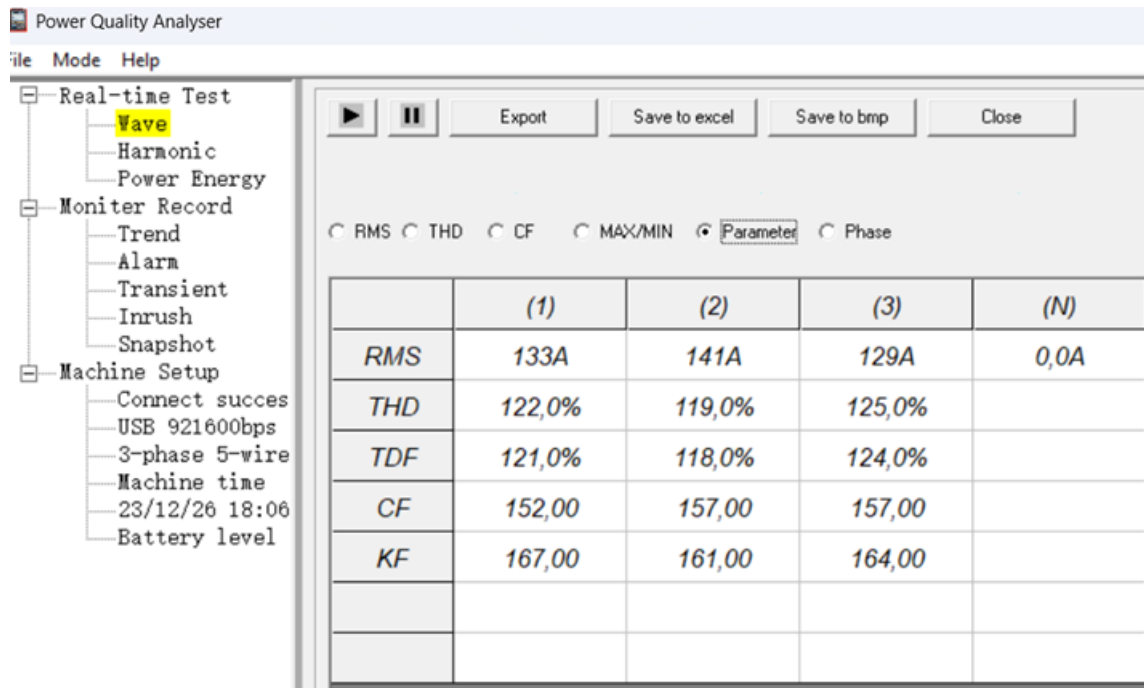


Figura 22: Mediciones con Power Quality System



## Referencias

- [1] R. Balderrama, S. Gopel, J. M. Lobo, P. Meneses, and K. Pérez, “Guía metodológica extendida de cementos,” 2019. [Online]. Available: [https://www.programaenergias.cl/wp-content/uploads/2019/05/REF\\_Guia\\_Metodologica\\_Extendida\\_Cementos\\_Web.pdf](https://www.programaenergias.cl/wp-content/uploads/2019/05/REF_Guia_Metodologica_Extendida_Cementos_Web.pdf)
- [2] “Cuestiones laborales y energéticas en la fabricación de cemento desde la 1.<sup>a</sup> conferencia técnica de la industria del cemento hasta la 50.<sup>a</sup>,” in *Registro de la conferencia técnica de la industria del cemento IEEE de 2008*, 2008.
- [3] “Estudio de modelado de dispersión de aire de una planta de cemento en rajasthan,” 2018.
- [4] A. Beiranvand and P. Cuffe, “Sankey network diagrams to depict bulk power transactions for operator situational awareness,” in *2021 IEEE Madrid PowerTech*, 2021, pp. 1–6.
- [5] T. Zhang, M. Long, and X. Jiajia, “Investigation on identification of boiler tube temperature anomaly based on sankey diagram,” pp. 33–35, 2022.
- [6] Programa de Gestión y Economía Ambiental, Departamento de Ingeniería Industrial, Universidad de Chile, “Diseño de un modelo de proyección de demanda energética global nacional de largo plazo,” Comisión Nacional de Energía, Santiago, Chile, Tech. Rep., 2008. [Online]. Available: <https://www.cne.cl/wp-content/uploads/2015/07/texto2.pdf>
- [7] L. R. Gilvonio Alegría, “El ahorro de energía en la industria cementera como estrategia de la excelencia operativa,” 2005.
- [8] I. de Investigación Geológico y Energético-IIGE, *BALANCE ENERGÉTICO NACIONAL 2022*, 2022, elaborado por Javier Fontalvo Díaz, Paola Ramírez Peñaherrera, Jessica Constante Argüello, Juan Fonseca Palacios.
- [9] W. P. Maigua Valenzuela, “Modelo de eficiencia energética como estrategia de negocio en la administración de la planta holcim-latacunga,” Trabajo de Titulación previo a la obtención del título

- de Magíster en Administración de Empresas, Universidad Técnica de Cotopaxi, Latacunga, Ecuador, 2023, dirección de Posgrado, Maestría en Administración de Empresas, Modalidad: Proyecto de Desarrollo, Tutor: Reinoso Peñaherrera Héctor Raúl, MSc. [Online]. Available: <https://repositorio.utc.edu.ec/bitstream/27000/9939/1/MUTC-001392.pdf>
- [10] H. K. H. Kamal Soundararajan and B. Su, “Sankey diagram framework for energy and exergy flows, applied energy,” *Applied Energy*, vol. 136, pp. 1035–1042, 2014.
- [11] A. Alzate-Ibáñez, J. Ramírez Ríos, and S. Alzate-Ibáñez, “Modelo de gestión ambiental iso 14001: Evolución y aporte a la sostenibilidad organizacional.” *Revista chilena de economía y sociedad*, vol. 12, no. 1, 2018.
- [12] J. Somoza Cabrera and P. Álvarez Medero, “Herramientas para la formulación de política energética: el análisis prospectivo en la construcción de escenarios energéticos y el uso de modelos para su formalización,” [https://www.nodo50.org/cubasigloXXI/economia/somozaca\\_301103.pdf](https://www.nodo50.org/cubasigloXXI/economia/somozaca_301103.pdf), 2003.
- [13] L. M. Rivera González, “Estudio técnico económico de la gasificación de ecuador,” 2020. [Online]. Available: [https://oa.upm.es/58110/1/LUIS\\_MIGUEL\\_RIVERA\\_GONZALEZ\\_01.pdf](https://oa.upm.es/58110/1/LUIS_MIGUEL_RIVERA_GONZALEZ_01.pdf)
- [14] A. O. Benito, A. P. Arena, and P. D. Rodríguez, “Avances de integración energética en mendoza de vehículos eléctricos y sistemas de generación distribuida: Modelo leap,” *ASADES*, 2021, disponible en: [https://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/200571/CONICET\\_Digital\\_Nro.1d90d686-a042-4d92-8794-2bb7190d7449\\_B.pdf?sequence=2&isAllowed=y](https://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/200571/CONICET_Digital_Nro.1d90d686-a042-4d92-8794-2bb7190d7449_B.pdf?sequence=2&isAllowed=y).
- [15] J. Fontalvo, P. Ramírez, and J. Constante, “Prospectiva de auto-generación en el ecuador mediante uso de modelo leap,” *Revista Técnica “energía”*, vol. XX, no. XX, pp. XX–XX, 2018, recibido: 11-05-2018, Aprobado tras revisión: 25-07-2018. [Online]. Available: <https://revistaenergia.cenace.gob.ec/index.php/cenace/article/view/323/308>
- [16] J. Correa Soto and otros, “Balance energético como elemento de la gestión de gobierno local en cuba: caso estudio municipio de

- cienfuegos,” *Universidad y Sociedad*, vol. 13, no. 1, pp. 266–275, 2021. [Online]. Available: [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_abstract&pid=S2218-36202021000100266](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S2218-36202021000100266)
- [17] OLADE, “Manual de balances de energía Útil 2017,” <https://www.olade.org/publicaciones/manual-de-balances-de-energia-util-2017/>, 2017, accedido el [5/1/2024].
- [18] “Manufacturing energy and carbon footprints (2018 mecs).” [Online]. Available: <https://www.energy.gov/eere/iedo/manufacturing-energy-and-carbon-footprints-2018-mecs>
- [19] O. L. A., “Procesos operativos del molino vertical y despacho,” 2023, documento en formato PDF. [Online]. Available: <file:///C:/Users/Portatil/Downloads/Procesos%20Induatenas.pdf>
- [20] Siemens. (s.f.) Tia portal: Integrated engineering for all automation components. [Online]. Available: <https://new.siemens.com/global/en/products/automation/tia-portal.html>
- [21] “Investigación y aplicación de tecnología de comunicación de interfaz de programa de aplicación de sistema de control autónomo de abb,” in *29.<sup>a</sup> Conferencia China de Control y Decisión (CCDC) de 2017*, 2017.
- [22] L. F. García and J. F. López, “Metodología para el seguimiento, medición y análisis energético de una planta manufacturera,” *Ingeniería, investigación y tecnología*, vol. 22, no. 2, pp. 289–298, 2021.
- [23] J. N. Emma, M. P. M. de la Cruz, P. G. Sandra, and H. G. M. Antonio, “Estructura y método para la elaboración de balances energéticos.”
- [24] SEI Leap Team. (Última actualización: 2022) LEAP User Guide. [Online]. Available: <https://leap.sei.org/help/leap.htm#t=Concepts%2FIntroduction.htm>
- [25] S. E. Institute. (2021) Leap: Low emissions analysis platform. Energy Community. Vienna, Austria. [Online]. Available: <https://www.energycommunity.org/default.asp?action=23&read=2828>
- [26] “Leap la plataforma de análisis de bajas emisiones [versión de software: 2020.1.109] instituto de medio ambiente de estocolmo. somerville, ma, estados unidos. <https://leap.sei.org/>”

- [27] Agencia de Sostenibilidad Energética, Ministerio de Energía, *Guía Metodológica de Auditoría Energética en Cementos*, primera ed., R. Balderama, S. Gopel, J. M. Lobo, P. Meneses, and K. Pérez, Eds. comunicaciones@rodaenergia.cl, www.rodaenergia.cl: RODA Energía, Abril 2019, proyecto desarrollado en el marco del Programa Bienes Públicos para la Competitividad - Convocatoria Eficiencia Energética, financiado por CORFO, el Ministerio de Energía y la Agencia de Sostenibilidad Energética.
- [28] United Nations Framework Convention on Climate Change, “Leap user guide,” [https://unfccc.int/resource/cd\\_roms/na1/mitigation/Module\\_5/Module\\_5\\_1/b\\_tools/LEAP/Manuals/Leap\\_User\\_Guide\\_Spanish.pdf](https://unfccc.int/resource/cd_roms/na1/mitigation/Module_5/Module_5_1/b_tools/LEAP/Manuals/Leap_User_Guide_Spanish.pdf), 2013, accedido el 17 de julio de 2023.
- [29] Centro Latinoamericano de Energía y Ambiente, “Manual de auditoría energética,” <https://clea.edu.mx/biblioteca/files/original/56cf64337c2fcc05d6a9120694e36d82.pdf>, 2013, accedido el 17 de julio de 2023.
- [30] P. Piña Rivera, “Estimación de la confiabilidad en motores con potencia superior a los 120kw de la empresa induatenas s.a.” <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/21938/1/UPS-CT009591.pdf>, 2022.