

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y TEXTIL



INFORME FINAL DEL CURSO DE ACTUALIZACIÓN PROFESIONAL

**“GESTIÓN DE ENERGÍA PARA OPTIMIZAR EL CONSUMO ENERGÉTICO EN UNA
PLANTA CEMENTERA”**

PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO QUÍMICO

ELABORADO POR

KEVIN GIBSON SÁNCHEZ CÁRDENAS

ID 0009-0007-5567-057X

ASESOR

Dr. Lic. JORGE LUIS BREÑA ORÉ

ID 0000-0001-6450-7052

LIMA – PERÚ

2025

Citar/How to cite	Sánchez Cárdenas [1]
Referencia/Reference	[1] N. Sánchez Cárdenas, " <i>Gestión de energía para optimizar el consumo energético en una planta cementera</i> " [Tesis de pregrado]. Lima (Perú): Universidad Nacional de Ingeniería, 2025.
Estilo/Style: IEEE (2020)	

Citar/How to cite	(Sánchez, 2025)
Referencia/Reference	Sánchez, N. (2025). <i>Gestión de energía para optimizar el consumo energético en una planta cementera</i> . [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional Cybertesis UNI.
Estilo/Style: APA (7ma ed.)	

Dedicatoria

A mi familia por siempre haber confiado en mí y estar presente en todo momento.

Agradecimientos

Al Doctor Jorge Breña y al Ingeniero Alex Pilco, por el apoyo y orientación a lo largo de todo el proceso de desarrollo de este trabajo.

Resumen

El presente trabajo detalla los lineamientos para establecer el sistema de gestión energético en una empresa cementera peruana, tomando como referencia la ISO 50001:2018. Como línea base se muestra la situación actual energética de la empresa en las secciones de clinkerización y molino de cemento. Como parte del proceso de auditoría se estableció indicadores específicos de energía en cada sección, así como actividades enfocadas a reducirlas. Con todas estas herramientas se determinaron los equipos y secciones que consumen más energía y se propuso un conjunto de mejoras para optimizar la eficiencia energética. Finalmente se muestra el ahorro de 4.1% y 6.1% asociado a la disminución del consumo energético, logrados sin inversión, en las secciones de clinkerización y molino de cemento, respectivamente.

Palabras clave - Gestión energética, sostenibilidad, eficiencia energética, indicadores específicos de energía.

Abstract

This paper details the guidelines for establishing an energy management system in a Peruvian cement company, referencing ISO 50001:2018. As a baseline, the current energy situation of the company in the clinkerization and cement grinding sections is presented. As part of the audit process, specific energy indicators were established for each section, as well as activities focused on reducing them. Using all these tools, the equipment and sections that consume the most energy were identified, and a set of improvements to optimize energy efficiency was proposed. Finally, savings of 4.1% and 6.1% associated with the decrease in energy consumption, achieved without investment, are shown in the clinkerization and cement grinding sections, respectively.

Keywords - Energy management, sustainability, energy efficiency, specific energy indicators.

Tabla de Contenido

	Pág.
Resumen.....	v
Abstract.....	vi
Introducción	xii
Capítulo I. Parte introductoria del trabajo	1
1.1. Generalidades.....	1
1.2. Descripción del problema de investigación	8
1.2.1. Planteamiento general del problema de investigación.....	10
1.2.2. Planteamientos específicos del problema de investigación.....	10
1.3. Objetivos del estudio.....	11
1.3.1. Objetivo general.....	11
1.3.2. Objetivos específicos	11
1.4. Antecedentes investigativos.....	11
1.4.1. Antecedentes internacionales	11
1.4.2. Antecedentes nacionales	16
Capítulo II. Marco teórico y conceptual	21
2.1. Marco teórico	21
2.1.1. Sistema de gestión de energía.....	21
2.1.2. La industria de cemento y la gestión de energía	29
2.1.3. Tipos de hornos de clinker según su eficiencia energética.....	32
2.1.4. Balance de masa y energía en un sistema de clinkerización.....	39
2.2. Marco conceptual.....	41
2.2.1. Norma internacional ISO 50001	41
2.2.2. Estrategias operativas relacionadas con el consumo energético	46
2.2.3. Estrategias de ahorro en las secciones de hornos y molinos	47

Capítulo III. Desarrollo del trabajo.....	55
3.1. Metodología de la investigación.....	55
3.1.1. Variables y operacionalización.....	56
3.1.2. Población y muestra.....	56
3.2. Desarrollo del trabajo.....	57
3.2.1. Diagnóstico energético.....	57
3.2.2. Diagnóstico energético actual.....	60
3.2.3. Consumo de energía.....	63
3.2.4. Consumo térmico específico en el horno de clinker.....	64
3.2.5. Consumo eléctrico específico en el molino de cemento.....	67
3.3. Indicadores de consumo de energía.....	68
3.3.1. Consumo térmico específico.....	68
3.3.2. Consumo eléctrico específico.....	69
3.4. Diseño de estrategias operativas.....	69
3.5. Estrategias operativas para reducir el consumo térmico y eléctrico.....	70
3.5.1 Horno de clinker.....	70
3.5.2 Molino de cemento.....	74
3.6. Diagnóstico energético luego de la implementación de las mejoras.....	75
3.7. Evaluación de los ahorros energéticos.....	77
3.7.1. Ahorro de energía térmica en el proceso de clinkerización.....	77
3.7.2. Ahorro de energía eléctrica en el molino de cemento.....	78
Capítulo IV. Análisis y discusión de resultados.....	80
Conclusiones.....	83
Recomendaciones.....	84
Referencias bibliográficas.....	85
Anexos.....	91

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1: <i>Desglose del consumo energético en una fábrica de cemento</i>	8
Tabla 2: <i>Proceso de producción de cemento</i>	31
Tabla 3: <i>Temperaturas en distintas fases del proceso cementero</i>	32
Tabla 4: <i>Tipos de procesos para la fabricación de clinker</i>	34
Tabla 5: <i>Relación de las estrategias operativas con el consumo energético</i>	46
Tabla 6: <i>Operacionalización de las variables</i>	56
Tabla 7: <i>Consumo térmico y eléctrico en el horno y molino de cemento (2023)</i>	64
Tabla 8: <i>Consumo térmico específico en el horno-2023</i>	66
Tabla 9: <i>Distribución del consumo eléctrico en el molino de cemento – 2023</i>	68
Tabla 10: <i>Estrategias operativas en el horno de clinker y molino de cemento</i>	69
Tabla 11: <i>Lineamientos operativos de estabilidad en el horno de clinker</i>	71
Tabla 12: <i>Dosificación adicional de carbón molido en función de la calidad</i>	74
Tabla 13: <i>Consumos energéticos específicos después de la ejecución del SGE</i>	76
Tabla 14: <i>Porcentaje de optimización en el horno y molino de cemento</i>	77
Tabla 15: <i>Ahorro económico por las mejoras ejecutadas en el horno de clinker</i>	78
Tabla 16: <i>Ahorro económico luego de las mejoras ejecutadas en el molino</i>	79

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1: <i>Ciclo Planificar-Hacer-Verificar-Actuar de la Norma ISO 50001</i>	3
Figura 2: <i>Empresas americanas acreditadas en la norma ISO 50001</i>	4
Figura 3: <i>Países con mayor número de empresas certificadas en la ISO 50001</i>	5
Figura 4: <i>Diagrama de flujo de la gestión energética</i>	22
Figura 5: <i>Partes interesadas en la implementación de la gestión energética</i>	23
Figura 6: <i>Ciclo Planificar-Hacer-Verificar-Actuar de la Norma ISO 50001</i>	24
Figura 7: <i>Enfoque estructurado para gestionar y reducir el consumo de energía</i>	25
Figura 8: <i>Diagrama de flujo para diseñar un sistema de eficiencia energética</i>	26
Figura 9: <i>Priorización de las oportunidades de mejora</i>	29
Figura 10: <i>Proceso de fabricación de cemento en una planta tradicional</i>	30
Figura 11: <i>Horno vertical de clinker</i>	35
Figura 12: <i>Horno rotatorio con pre-calentador</i>	37
Figura 13: <i>Horno rotatorio con calcinador</i>	38
Figura 14: <i>Balance de masa en el proceso de producción de clinker y cemento</i>	40
Figura 15: <i>Balance de energía en el proceso de producción de clinker</i>	41
Figura 16: <i>Ciclo de gestión de energía ISO 50001</i>	43
Figura 17: <i>Sistema de gestión energética bajo ISO 50001</i>	44
Figura 18: <i>Ahorro energético en la preparación de materias primas</i>	48
Figura 19: <i>Ahorro energético en el proceso de clinkerización</i>	51
Figura 20: <i>Ahorro energético en el proceso de molienda de cemento</i>	53
Figura 21: <i>Tipos de diagnósticos energéticos</i>	58
Figura 22: <i>Metodología del diagnóstico energético</i>	59
Figura 23: <i>Proceso de producción de cemento y consumos de energía</i>	61
Figura 24: <i>Flujos de entrada y salida de energía en el proceso de clinkerización</i>	65
Figura 25: <i>Flujos de entrada de energía en el proceso de molienda</i>	67

Lista de Abreviaturas

Aditivo CS2: Aditivo de cemento mejorador de calidad de alto desempeño

Ciclo PDCA: Ciclo Planificar-Hacer-Verificar-Actuar

CO₂: Dióxido de carbono

DCS: Sistema de Control Distribuido

ERP: Planificación de Recursos Empresariales

ISO 50001: Norma internacional de Sistema de Gestión de Energía

LECO: Empresa proveedora de equipos para análisis de poder calorífico

MES: Sistema de Ejecución de Manufactura

SGE: Sistema de Gestión de Energía

(TIR): Tasa Interna de Retorno

USE: Usos Significativos de la Energía

(VAN): Valor Actual Neto

Introducción

El presente trabajo expone una metodología detallada para la implementación de un Sistema de Gestión de la Energía (SGE) en una planta cementera peruana. Este trabajo surge de la necesidad de reducir el consumo energético en este tipo de industria, reduciendo los costos y disminuyendo el impacto ambiental. El propósito de este trabajo es aplicar un enfoque detallado de la gestión de energía, que abarque desde el diagnóstico energético como línea base, hasta la evaluación técnica y económica de las estrategias de mejora identificadas para reducir los costos energéticos. La estructura del estudio se organiza en seis capítulos: el Capítulo I presenta la introducción al tema, el planteamiento del problema, los objetivos generales y específicos, así como los antecedentes relacionados con la investigación; el Capítulo II desarrolla el marco teórico y conceptual, incluyendo una revisión del SGE y su relación con la industria cementera, además de una descripción de los tipos de hornos de clinker utilizados actualmente y la forma en que una auditoría energética permite identificar oportunidades de mejora; el Capítulo III expone la metodología propuesta para la ejecución del SGE, desde el diagnóstico energético hasta la evaluación técnica y económica de las estrategias de ahorro; el Capítulo IV analiza los resultados obtenidos y los compara con los presentados por otras empresas del sector; el Capítulo V presenta las conclusiones del estudio; y finalmente, el Capítulo VI ofrece recomendaciones que complementan el trabajo desarrollado y pueden aplicarse en investigaciones futuras.

Capítulo I. Parte introductoria del trabajo

1.1 Generalidades

En un panorama global en el que el crecimiento energético mundial se enfrenta a muchos desafíos tales como la escasez de recursos, el cambio climático, deficiente acceso a la energía y la contaminación ambiental. Implementar acciones de eficiencia energética que permitan la transición hacia fuentes renovables que se integren a la red eléctrica existente. Esto último debe complementarse con el manejo óptimo de la energía, implementando un plan de medidas de eficiencia en todos los sectores, que permitan reducir los costos asociados a la producción y distribución de energía. Esto va de la mano con políticas que promuevan la sostenibilidad e innovación en todos los sectores de la industria cementera.

A nivel regional, las empresas cementeras están trabajando en implementar las mejores prácticas energéticas, involucrando a todas las áreas. Casos como la empresa Holcim que en algunas plantas opera con energía 100% renovable, principalmente solar y de fuentes hidráulicas (Holcim, 2024), y trabajan en la mejora de la eficiencia de sus edificios, reduciendo hasta 20% de energía eléctrica, para disminuir los costos de producción y emisiones de CO₂ (Holcim, 2024). En la empresa Argos se está trabajando en conjunto con las universidades para reducir hasta en 15% el consumo de energía del proceso de clinkerización, mediante herramientas de inteligencia artificial y aprendizaje automático (Cemento Argos, 2022). Además de tener plantas que mediante el co-procesamiento les ha permitido reducir a la mitad el consumo de energía, obteniendo en algunas plantas el certificado de compromiso de reducción y uso eficiente de la energía (Cementos Argos, 2021). En Cemex también tienen como objetivo para el 2030 que cerca del 40% de la energía provenga de energía de fuentes renovables principalmente solar y eólica (CEMEX,2024). Asimismo, la empresa está involucrada en proyectos de optimización y recuperación de energía residual. El esfuerzo de todas estas empresas

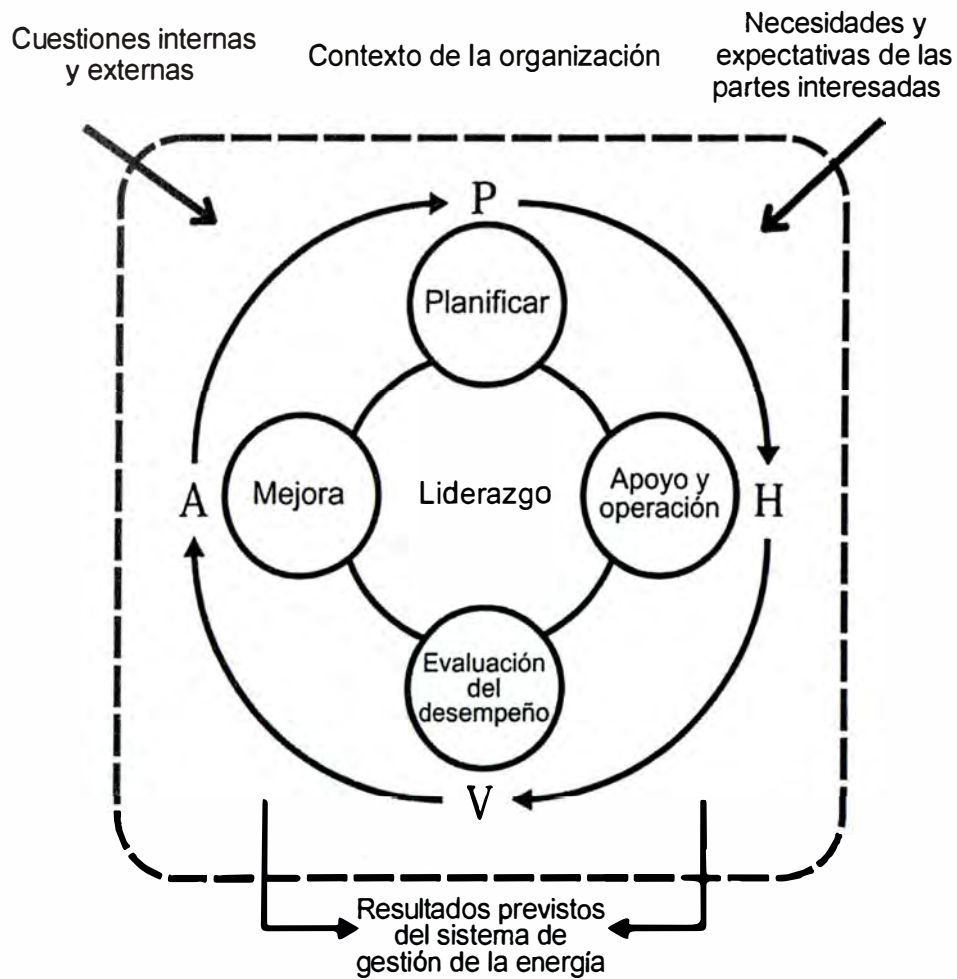
líderes en la región está permitiendo mejorar la eficiencia del SEG, para ser más rentables y sostenibles. Esto como parte de las metas de llegar al 2050 con cero emisiones netas de CO₂. Hay que mencionar también que la adopción y ejecución de un SGE puede permitir ahorrar hasta 40%, mediante el óptimo control de proceso y el desarrollo de buenas prácticas operativas.

La eficiencia energética incentiva la implementación y ejecución del SGE. Por ello, es muy importante comprender las recomendaciones internacionales acerca del tema mencionado. Esto para adecuarlos al contexto de la región y generar ahorros significativos en costos, uso eficiente de los recursos, disminuir las emisiones industriales y optimizar el uso de la energía. Teniendo en cuenta estos focos y el interés por resolver la problemática energética de escases y ambiental que enfrentan las empresas, en el año 2011 surge la norma internacional ISO 50001 acerca del SGE. Esta norma fomenta la mejora continua, uso eficiente del consumo de energía, seguridad energética, compromiso organizacional y regulaciones que favorezcan a este fin.

Beltrán et al. (2022), en su trabajo de investigación titulado “Sistemas de gestión de la energía en la industria latinoamericana: caso de estudio Colombia” (p. 1), menciona que la norma ISO 50001 se basa en las mejores prácticas energéticas realizadas a nivel internacional y se basa en el ciclo de mejora continua: Planificar, Hacer, Verificar y Actuar (PDCA). Este ciclo permite mejorar el desempeño energético y lograr la mejora continua, obteniendo resultados óptimos en la organización, como indica la Figura 1.

Figura 1

Ciclo Planificar-Hacer-Verificar-Actuar de la Norma ISO 50001



Nota: Extraído de "Energy Management Systems in Latin American Industry: Case Study Colombia" (p. 5), por Beltrán, J., Quintero, M., López, D., y Carvajal, S, 2022, *Tecnológicas*.

Es importante resaltar la posibilidad de adoptar el SGE sin tener la certificación ISO 50001, pues se pueden seguir los lineamientos de eficiencia energética establecidos, pero se ha comprobado que los resultados óptimos se obtienen con las organizaciones que se han acreditado con la ISO 50001. Se observa en la Figura 2 las organizaciones acreditadas en el continente americano.

Figura 2

Empresas americanas acreditadas en la norma ISO 50001



Nota: Adaptado de "Energy Management Systems in Latin American Industry: Case Study Colombia" (p. 6), por Beltrán, J., Quintero, M., López, D., y Carvajal, S., 2022, *Tecnológicas*.

Sin embargo, cambia el panorama a nivel internacional, según Beltrán et al. (2022), en su trabajo "Sistemas de gestión de la energía en la industria latinoamericana: caso de estudio Colombia", Alemania encabeza la lista de organizaciones certificadas con 6,436 certificaciones, China con 3.748 certificaciones, y Reino Unido e Italia con 1,277 y 1,242, respectivamente (p. 6), como se observa en la Figura 3. La cantidad de empresas acreditadas en un país está relacionada con las políticas de gobierno implementadas. Estas políticas permiten procesos eficientes, sostenibles y amigables con el medio ambiente.

Figura 3

Países con mayor número de empresas certificadas en la ISO 50001



Nota: Adaptado de "Energy Management Systems in Latin American Industry: Case Study Colombia" (p. 6), por Beltrán, J., Quintero, M., López, D., y Carvajal, S, 2022, Tecnológicas.

Con el creciente aumento en los costos de la energía y las crecientes regulaciones en el aspecto energético y medioambiental, optimizar el consumo energético es importante para garantizar la sostenibilidad y rentabilidad de las empresas. La adaptación del sistema de gestión energética (SGE) ofrece una solución efectiva para medir, hacer seguimiento, controlar y optimizar el consumo energético, promoviendo la eficiencia y la sostenibilidad. Aunque la mayoría de las empresas han mejorado su desempeño energético en los últimos 30 años, todavía existe un gran potencial de mejora (Gonçalves y Dos Santos, 2019).

Actualmente se tiene muchos avances tecnológicos del sistema de gestión de energía, no obstante, muchas organizaciones todavía enfrentan desafíos importantes para la adopción efectiva. Estos desafíos surgen de la carencia de conocimiento y experiencia en estas nuevas tecnologías, falta de disrupción y la falta de capacidad para implementar nuevas tecnologías y soluciones innovadoras en los procesos actuales. Por lo tanto, es clave investigar, desarrollar y promover metodologías y estrategias que faciliten la adopción y ejecución de la gestión energética en las organizaciones. Para esto es

necesario el involucramiento a todo nivel para que este proceso pueda ser llevado con éxito.

Cabe resaltar que la industria cementera representa uno de los mayores usuarios de energía en el planeta. Para tener un mejor panorama del contexto actual, se detalla a continuación cómo se fabrica el cemento: Primero se inicia con la explotación de las materias primas como caliza, hierro y arcilla, para luego ser triturados y reducidos de tamaño en un molino de bolas o vertical a un nivel que permita mezclarse de forma adecuada y ser almacenado en un silo, posteriormente esta mezcla pasa a un horno rotatorio o vertical, el cual se precalienta en una torre en contracorriente a 900 °C, para luego entrar a un horno rotatorio llegando a temperaturas cercanas a 1450 °C, en este punto los materiales se combinan para formar compuestos como silicatos de calcio (C_3S y C_2S) y otros componentes, el producto llamado clinker es enfriado bruscamente en un enfriador de parrilla o dependiendo de la tecnología llevado a alrededor de 100 °C, para luego ser almacenado en un silo y en conjunto con el yeso y otras adiciones molerse finamente en un molino de bolas o vertical. El producto final dependiendo de su composición es el cemento Portland o adicionado. La producción de clinker genera aproximadamente 0.8 a 0.9 toneladas de CO_2 por cada tonelada de clinker fabricada, estas emisiones provienen principalmente de dos fuentes: caliza ($CaCO_3$) que se transforma principalmente en óxido de calcio y en menor proporción en dióxido de carbono y representa el 60-65% de las emisiones totales de CO_2 . La combustión de combustibles fósiles representa del 35 a 40% de las emisiones (Antunes et al. 2022).

La energía eléctrica consumida se reparte en estas secciones: molino de cemento, cuya función principal es reducir el tamaño de la partícula y cumplir con los parámetros de calidad. Este proceso se puede realizar en un molino horizontal de bolas o molino vertical, en algunos casos se puede utilizar la prensa de rodillos cuya capacidad es mayor pero menos eficiente. El consumo eléctrico del molino de cemento representa el 41% del consumo eléctrico de la empresa, principalmente por el uso de motores de alta potencia.

Respecto al molino del crudo, su función es preparar el material para ingresar a los hornos, cumpliendo con las especificaciones requeridas de finura. Esta sección representa el 32% del consumo eléctrico general de la planta. Y por último los equipos de homogenización, calcinación y clinkerización, cuya función principal es transportar el material molido hacia los hornos, mezclar la harina cruda, producir la harina caliente y posteriormente el clinker. Esta sección consume el 21% del consumo eléctrico total de la planta. Finalmente se tiene que el consumo de la energía térmica se distribuye principalmente en la sección de clinkerización y calcinación, estas secciones representan el 96% del consumo de energía térmica de planta, y el 75% del consumo global de energía tanto eléctrico como térmico (MINEM, 2017). Cabe mencionar que el consumo energético en las plantas cementeras puede superar el 40% de los costos totales de producción (Gilvonio, 2005).

En las empresas cementeras se emplea la electricidad y combustibles fósiles y alternos como fuentes de energía para todo el proceso, la energía térmica proviene principalmente gas natural y carbón. La distribución del consumo energético se distribuye de la siguiente manera: 89% para el consumo térmico y 11% para el consumo eléctrico (MINEM, 2017). En la Tabla 1 se puede observar cómo se distribuye la energía en las fases del proceso de fabricación del cemento. El chancado y la molienda de materias primas representan el 63% del consumo general de la energía eléctrica en la empresa, mientras la clinkerización representa el 96% del total del consumo térmico. Esto por la presencia de motores de alto consumo, con potencia nominal superior a los 1000 kW y quemadores con capacidades de hasta 400 GJ/h.

Tabla 1*Desglose del consumo energético en una fábrica de cemento*

Ítem	Proceso	Consumo de energía eléctrica (%)	Consumo de energía térmica (%)
1	Chancado de materias primas	3	4
2	Chancado, triturado y molienda de crudo	32	0
3	Homogenización, pre calcinado y clinkerización	21	96
4	Molienda de cemento y envasado	41	0
5	Servicios generales	2	0
6	Iluminación	1	0

Nota: Adaptado de “*Guía de Orientación del Uso Eficiente de la Energía y de Diagnóstico Energético-Industrias Cementeras*” (p. 13), por DGEE-MINEM, 2017.

Con todo esto mencionado, el SGE es fundamental para el crecimiento sostenible de una organización, permitiendo ahorrar costos y ser más competitivo en el mercado. Por lo que establecer las bases del SGE es el primer paso para apuntar a convertirse en una organización sostenible que promueva a todo nivel el uso eficiente de los recursos y en consecuencia esté alineado a los estándares ambientales internacionales, logrando la excelencia operativa.

1.2 Descripción del problema de investigación

El presente trabajo de investigación se realiza en una empresa cementera peruana, la que requiere ser más eficiente para competir en el rubro y mantener el posicionamiento. En los últimos años, han ingresado a la región nuevos competidores con presencia a nivel mundial, adicional al aumento de importadores de clinker, los cuáles presentan un costo competitivo. Por lo tanto, es importante buscar nuevas formas de optimizar los costos, mediante nuevas tecnologías y las mejores prácticas que permitan establecer estándares de calidad que vaya de la mano con la mejora continua, la excelencia operativa y la cultura de aprendizaje. Cabe mencionar que, en la planta cementera peruana en estudio, el 40% del costo total de fabricación de cemento está destinado al costo energético, distribuido de

la siguiente manera: 70% al consumo térmico y 30% al consumo eléctrico, por lo que implementar acciones para reducir este consumo es clave para ser una empresa más eficiente. Actualmente el consumo térmico del horno vertical de clinker, debido a su tecnología antigua, es 35% mayor que los hornos estándares en el mercado, principalmente hornos rotatorios horizontales de alto rendimiento. Esto debido a la baja eficiencia de combustión por la mala distribución de aire y combustible, lo que genera una combustión incompleta y, en consecuencia, un mayor consumo energético. Asimismo, la distribución no uniforme del calor aumenta el consumo energético y, en condiciones no controladas, genera problemas de calidad en el clinker. El horno vertical debido a su tecnología tiene menor capacidad que los hornos horizontales presentes en las otras plantas, por lo que el consumo específico de energía es mayor.

Respecto al sistema de molienda del cemento, se realiza en un molino de bolas, siendo estos 15% menos eficientes que los molinos verticales, debido a la fricción y desgaste de las bolas con el casco, generando mayores costos operativos y de mantenimiento. Esto representa una problemática sin rumbo conocido, debido al alto costo de inversión de implementar molinos verticales. Según datos internos del departamento de producción (2024), no disponibles públicamente, se tiene que utilizar equipos de secado para reducir la humedad de alrededor de 25% al 5%. Adicional a esto, en los siguientes años se proyecta un aumento en la fluctuación de la demanda de cemento, debido a factores económicos y políticos.

El 2024 se tuvo una caída del 4% en las ventas, generando menor dilución de costos energéticos por despacho. Asimismo, se proyecta que en los siguientes años el costo de las materias primas, especialmente el carbón, combustible principal utilizado en la producción de cemento, aumente un 4% de manera anual y con mucha variabilidad en la calidad de este. Durante el último año, la planta tuvo problemas con el suministro de carbón, por la calidad de este y la falta de proveedores que cumplan con los requerimientos mínimos en temas de calidad, afectando la operación. El efecto ambiental también es un

problema importante, dado que la empresa cementera en estudio genera las mayores emisiones específicas de CO₂ en la región, por lo que este también es un tema importante para tener en cuenta y está asociado con las regulaciones e impuestos que se enfrenta en un futuro cercano por parte de las autoridades. Actualmente en países europeos ya hay establecido el impuesto al carbono y, sin ir muy lejos, en Chile y Colombia también han implementados esas medidas. Con todo lo descrito, la implementación y difusión de indicadores energéticos como seguimiento y control, mejoraría la eficiencia energética. Asimismo, un plan para establecer las buenas prácticas operativas, mediante la optimización de la finura de la alimentación, control de la humedad, mejora de la quemabilidad del crudo, optimización del consumo de carbón en el proceso e implementación de lineamientos operativos tendrían un efecto positivo en la estabilidad de la operación.

Respecto al proceso de molienda de cemento, mejorar el rendimiento es el foco principal para reducir el consumo energético específico. Por lo tanto, se requiere tomar las siguientes acciones tales como mejorar la granulometría de las materias primas, dar énfasis al seguimiento de los parámetros de operación, optimizar del uso de aditivo tanto en dosificación como en concentración, así mismo las auditorias periódicas representan un papel importante en la evaluación de la eficiencia del separador y del molino y, por último, y no menos importante, establecer los lineamientos para mejorar la operación. En base a estas problemáticas nos podemos preguntar los siguiente:

1.2.1 Planteamiento general del problema de investigación

¿En qué medida la gestión de la energía permite optimizar el consumo energético en una planta cementera?

1.2.2 Planteamientos específicos del problema de investigación

¿Qué estrategias operativas sin inversión inicial pueden implementarse para reducir el consumo térmico en el horno de clinker?

¿Qué estrategias operativas sin inversión inicial pueden implementarse para reducir el consumo eléctrico en el molino de cemento?

1.3 Objetivos del estudio

1.3.1 Objetivo general

Reducir el consumo energético en la sección de hornos y molino de cemento a través de la implementación de la gestión de energía.

1.3.2 Objetivos específicos

Reducir el consumo térmico del horno de clinker mediante la implementación de la gestión de la energía.

Reducir el consumo eléctrico del molino de cemento mediante la implementación de la gestión de la energía.

1.4 Antecedentes investigativos

1.4.1 Antecedentes internacionales

Aouragh y Bouteldja (2024) realizaron un trabajo de investigación titulado "El impacto de la implementación del Sistema de Gestión de Energía según la norma internacional ISO 50001:2018 en el desempeño energético de las empresas industriales: Estudio de caso de Ain Touta Cement Company (SCIMAT)" (p. 1). Este estudio se hizo con un enfoque descriptivo-analítico y un diseño de caso para evaluar cómo la implementación del SGE alineado a la ISO 50001:2018 influye en la eficiencia energética dentro de la industria del cemento. La investigación se centró en la empresa Ain Touta Cement Company, ubicada en Argelia, y se centró en la recolección de datos a partir de documentos internos de la empresa y entrevistas con el personal. Se evaluó los efectos de la adopción del SGE en el consumo y optimización del uso de energía en la empresa cementera. Entre los hallazgos importantes, se demostró que la ejecución del estándar ISO 50001:2018 permitió reducir el consumo de energía eléctrica y mejorar su rendimiento. Sin embargo, el

estudio también evidenció dificultades en la gestión de indicadores relacionados con la eficiencia térmica, lo que sugiere la necesidad de realizar mejoras en este aspecto.

Naveen et al. (2022) llevaron a cabo el trabajo de investigación titulado "Evaluación de un sistema de gestión de energía mediante la implementación de tecnología avanzada en una fábrica de cemento en Tamil Nadu, India" (p. 1). La investigación empleó un enfoque mixto, utilizando tanto datos cualitativos como cuantitativos. La población estuvo centrada por una planta cementera en Tamil Nadu, India. Para recopilar la información, se realizaron entrevistas y se analizaron aspectos como el ahorro de energía, la tasa de retorno de la inversión y el consumo energético anual. El objetivo principal del trabajo fue evaluar la eficiencia de un SGE basado en tecnología avanzada en una fábrica de cemento, para optimizar la eficiencia energética y mejorar el desempeño operativo de la planta. Los hallazgos del estudio demostraron que la implementación de nuevas tecnologías permitió mejorar en un 5% la eficiencia en el uso de la energía. Además, se logró un ahorro total de 30 millones de dólares anuales y se estableció que la inversión en el sistema de gestión energética se recuperó en aproximadamente 0.34 años. A nivel ambiental, la optimización del consumo energético contribuyó a la reducción de 38,371 toneladas métricas de CO₂.

Beltrán et al. (2022) llevaron a cabo el trabajo de investigación titulado "Sistemas de gestión de la energía en la industria latinoamericana: caso de estudio Colombia" (p. 1). En este trabajo, mencionan que la industria ha aumentado su dependencia hacia combustibles fósiles, generando un uso masivo y un aumento de las emisiones de gases al ambiente, principalmente CO₂ causante del calentamiento global, generando una gran preocupación ambiental mundial. Se mostró cómo se utiliza la energía de forma eficiente, mediante la adopción del SGE en todas las organizaciones, buscando la sostenibilidad y eficiencia. La contribución de este artículo es que presenta una revisión detallada sobre la incorporación del SGE en las industrias, destacando principalmente las barreras y factores que motivan a las empresas para su implementación, además menciona la posición que desempeña la dirección y gerencia en las empresas para convertir las iniciativas de mejora

en algo sostenible a lo largo del tiempo y no solo quede como algo aislado, adicional a eso se enfoca en analizar la situación energética en

Alarcón et al. (2021) llevaron a cabo el trabajo de investigación titulado "Sistemas de gestión de energía y mantenimiento en el contexto de la Industria 4.0: Implementación en un caso real" (p. 1), en el que analizaron la integración de los sistemas de gestión de energía (EMS) y gestión de mantenimiento (MMS) en una planta química con el propósito de optimizar la eficiencia energética y reducir los costos operativos. Esta investigación, de carácter aplicado, se desarrolló en una planta ubicada en El Palmar (Murcia, España). La población considerada correspondió a los equipos industriales de la planta, mientras que la muestra estuvo compuesta por los sistemas de gestión implementados. Para la recopilación de información, se utilizaron analizadores de redes eléctricas y diversas herramientas de software empresarial, tales como ERP, DCS y MES. El objetivo central de esta investigación fue incorporar los sistemas EMS y MMS dentro de la administración general de la empresa con el fin de usar eficientemente energía y mejorar la planificación del mantenimiento, permitiendo así minimizar fallas imprevistas y reducir los costos asociados a la operación. Entre los resultados más significativos del estudio, se demostró que la implementación de estos sistemas en la gestión empresarial redujo los costos energéticos, estimadas en alrededor de un 50% en la última década. Asimismo, se observó una mejora en la confiabilidad de los equipos de planta. Además, la combinación de indicadores energéticos y operacionales facilitó la detección anticipada de fallos en maquinaria dinámica, favoreciendo la optimización de los períodos de mantenimiento preventivo y la reducción de costos.

Prasetya et al. (2021) llevaron a cabo el trabajo de investigación titulado "El papel del Sistema de Gestión Energética basado en ISO 50001 para el ahorro de costes energéticos y la reducción de emisiones de CO₂: A revisión de la implementación, beneficios y retos" (p. 1). Se trata de un estudio de revisión en el que se analizaron diversas fuentes científicas y documentos oficiales de organizaciones internacionales, asociaciones

y políticas gubernamentales. La investigación se enfocó en la ejecución del SGE en diferentes sectores industriales a nivel mundial. Para recopilar información, se emplearon técnicas de revisión documental y comparación de casos de estudio previos sobre la aplicación de esta normativa. Se evaluó el impacto del estándar ISO 50001 en la gestión energética de las empresas, examinando sus beneficios en la optimización del consumo de energía, la disminución de costos operativos y la mitigación de emisiones de CO₂. Asimismo, se identificaron los principales obstáculos y retos que enfrentan las organizaciones al adoptar este sistema de gestión. Los hallazgos más relevantes indican que la adopción de la ISO 50001 ha permitido una mejora significativa en el consumo eficiente de la energía en distintas industrias. Esto ha generado una reducción considerable en los costos energéticos y ha contribuido a la reducción de las emisiones de gases al ambiente. Además, el cumplimiento de esta normativa ha facilitado la adhesión a regulaciones ambientales y ha fomentado prácticas sostenibles en diversas empresas.

Cantini et al. (2021a) llevaron a cabo el trabajo de investigación titulado "Soluciones Tecnológicas para la Eficiencia Energética en la Industria Cementera: Un Caso de Estudio en Italia" (p. 1). En esta investigación se empleó una metodología basada en auditorías energéticas, con el propósito de evaluar el consumo de energía en diversas plantas de fabricación de cemento en Italia. La muestra estuvo compuesta por 48 plantas cementeras ubicadas en diferentes regiones del país. Para la recopilación de datos, se utilizaron auditorías energéticas, las cuales fueron analizadas con la colaboración de la asociación italiana de cemento (Federbeton) y la Agencia Nacional Italiana (ENEA). El propósito principal de este estudio fue ofrecer un análisis detallado sobre el uso de energía en el sector cementero de Italia, con el objetivo de evaluar las principales estrategias tecnológicas implementadas para mejorar la eficiencia energética. Asimismo, se pretendió entender las causas que influyen en la selección de determinadas soluciones y proyectar posibles tendencias futuras en el sector. Los resultados indicaron que la mayor parte de empresas optaron por estrategias dirigidas a reducir el consumo energético en sistemas

y políticas gubernamentales. La investigación se enfocó en la ejecución del SGE en diferentes sectores industriales a nivel mundial. Para recopilar información, se emplearon técnicas de revisión documental y comparación de casos de estudio previos sobre la aplicación de esta normativa. Se evaluó el impacto del estándar ISO 50001 en la gestión energética de las empresas, examinando sus beneficios en la optimización del consumo de energía, la disminución de costos operativos y la mitigación de emisiones de CO₂. Asimismo, se identificaron los principales obstáculos y retos que enfrentan las organizaciones al adoptar este sistema de gestión. Los hallazgos más relevantes indican que la adopción de la ISO 50001 ha permitido una mejora significativa en el consumo eficiente de la energía en distintas industrias. Esto ha generado una reducción considerable en los costos energéticos y ha contribuido a la reducción de las emisiones de gases al ambiente. Además, el cumplimiento de esta normativa ha facilitado la adhesión a regulaciones ambientales y ha fomentado prácticas sostenibles en diversas empresas.

Cantini et al. (2021a) llevaron a cabo el trabajo de investigación titulado “Soluciones Tecnológicas para la Eficiencia Energética en la Industria Cementera: Un Caso de Estudio en Italia” (p. 1). En esta investigación se empleó una metodología basada en auditorías energéticas, con el propósito de evaluar el consumo de energía en diversas plantas de fabricación de cemento en Italia. La muestra estuvo compuesta por 48 plantas cementeras ubicadas en diferentes regiones del país. Para la recopilación de datos, se utilizaron auditorías energéticas, las cuales fueron analizadas con la colaboración de la asociación italiana de cemento (Federbeton) y la Agencia Nacional Italiana (ENEA). El propósito principal de este estudio fue ofrecer un análisis detallado sobre el uso de energía en el sector cementero de Italia, con el objetivo de evaluar las principales estrategias tecnológicas implementadas para mejorar la eficiencia energética. Asimismo, se pretendió entender las causas que influyen en la selección de determinadas soluciones y proyectar posibles tendencias futuras en el sector. Los resultados indicaron que la mayor parte de empresas optaron por estrategias dirigidas a reducir el consumo energético en sistemas

auxiliares, como motores, bombas y compresores, debido a su fácil aplicación y menores costos operativos. En particular, la implementación de variadores de velocidad en estos equipos fue la intervención más utilizada y recomendada. Además, se observó un creciente interés en el uso del ciclo ORC (Organic Rankine Cycle) para la recuperación de calor, aunque su adopción se ve limitada por el alto tiempo de retorno de la inversión.

En el informe de ONUDI (2015) llevaron a cabo el trabajo titulado “Guía Práctica para la Implementación de un Sistema de Gestión de la Energía” (p. 1), evalúa el rendimiento energético de las empresas para mejorar la eficiencia, reducir costos y ser más competitivo, y lo logra mediante el SGE basado en el ciclo de mejora continua de Deming: Planificar – Hacer – Verificar – Actuar y va en línea con la norma ISO 50001. El objetivo de este trabajo fue adoptar el sistema de gestión de energía lo más sencillo posible. Asimismo, presentar algunos beneficios claves de la implementación del SGE, tales como ahorros en costos energéticos, disminución de emisiones de gases de efecto invernadero, mínima exposición a la fluctuación de los precios de la energía y mayor seguridad energética, acciones importantes de bajo costo que se puedan aplicar de manera continua y con resultado efectivos, mayor involucramiento del personal en iniciativas de mejora energética. Entre los hallazgos encontrados se mostró que hay acciones importantes de bajo costo que se puedan aplicar de manera continua y con resultado efectivos. Se dio el ejemplo de los resultados obtenidos de una auditoría energética en una empresa, donde se dejó de usar una compresora de 75 kW, permitiendo ahorrar un 50% de energía eléctrica, solo con la reparación de fugas, mostrando la importancia de que no siempre los proyectos de mayor inversión ahorran mayor energía.

Gilvonio (2005) en su trabajo de investigación titulado “El ahorro de la energía en la industria cementera como estrategia de la excelencia operativa” (p. 1), analiza las principales variables que son necesarias medir y hacer seguimiento para optimizar el consumo de energía en la planta, con el propósito de establecer medidas y estrategias para lograr la eficiencia energética, reducción de costos y responsabilidad social. Se da

énfasis en la cadena productiva y el sistema de gestión de producción de cemento, con el objetivo de ser más eficiente y competitivo en base a la adopción de un SGE. Para ello, primero se realizó un diagnóstico energético de todo el proceso sección por sección, elaborando un plan con medidas que requieran inversión y otras sin inversión como la adopción del SGE. Se propuso un modelo de gestión integral de la energía con potencial de ahorro en las diferentes etapas de la cadena productiva en una empresa de la industria cementera, validando la efectividad. La propuesta incluye la importancia de alinear la visión de la empresa con los objetivos resaltando el valor agregado que da el sistema energético en la rentabilidad económica. Entre los hallazgos encontrados se mostró que el uso de mineralizadores en el proceso, cambio de ladrillo refractario e implementación de indicadores como el RAS generó un ahorro de US\$ 6,285 por día o US\$ 3.29 por t de cemento, que representa el 10% del costo total de producción. El análisis energético se enfocó en las secciones de hornos y de molienda de cemento, ya que estas áreas consumen alrededor del 96.35% de la energía consumida en planta.

1.4.2 Antecedentes nacionales

Colchado (2025) en su trabajo de investigación titulado "Implementación del sistema de gestión energética ISO 50001 en planta de aceite residual de 165 t de capacidad" (p. 1), para reducir el uso de energía en una empresa especializada en el refinamiento de aceite de pescado. Este trabajo se ejecutó siguiendo un enfoque cuantitativo y un diseño pre-experimental. La población estuvo constituida por la empresa Representaciones Nahuel S.R.L., mientras que la muestra analizó el consumo energético en el periodo comprendido dentro de un año. Para la recopilación de información, se emplearon entrevistas, observación directa, revisión de documentos técnicos y registros internos, además del uso de instrumentos de medición como multímetros y pinzas amperimétricas. El propósito principal de este estudio fue implementar un SGE basado en la norma ISO 50001 en una planta de refinación de aceite residual con una capacidad de almacenamiento de 165 t. A través de este sistema, se buscó mejorar la eficiencia

energética de la empresa, promoviendo un consumo más eficiente y sostenible de los recursos. Los hallazgos de la investigación demostraron que, tras la aplicación del SGE, la eficiencia energética de la empresa aumentó en un 10%. Asimismo, se optimizaron los indicadores energéticos, lo que se tradujo en una reducción de costos, principalmente en el consumo de electricidad y combustible. Además, se estableció una línea base energética que permitió analizar el impacto de las acciones implementadas y mejorar el desempeño en los procesos industriales más críticos.

Mendoza et al. (2023a) realizaron un trabajo de investigación titulado "Reducción de costos energéticos basados en la norma ISO 50001 en los sistemas de refrigeración para incrementar la rentabilidad de una empresa agroindustrial en Perú" (p. 1). Esta investigación, de tipo aplicada y con un diseño diagnóstico-propositivo, tuvo como finalidad disminuir los costos energéticos de una empresa agroindustrial mediante la adopción de un sistema energético tomando como referencia la norma ISO 50001. La población y muestra del estudio correspondió a los motores eléctricos de todo el sistema de refrigeración de la empresa en cuestión, ubicada en Trujillo. Para recopilar la información necesaria, se aplicó una encuesta al jefe de operaciones, se realizó una evaluación directa de los equipos eléctricos y se analizaron documentos internos que registraban el consumo energético y los niveles de producción. El propósito central de la investigación fue optimizar el uso de la energía en los sistemas de refrigeración mediante la ejecución de la norma ISO 50001, con el objetivo de mejorar la rentabilidad de la empresa. Los principales hallazgos indicaron que la empresa no disponía de un SGE y que sus motores eléctricos operaban con una eficiencia baja, fluctuando entre 0.6 y 0.8. Como parte de la propuesta de mejora, se planteó la adquisición de motores de alta eficiencia (0.95) y la ejecución de un plan de gestión energética. Se estimó que estas acciones reducirían los costos energéticos en un 20.05% y mejorarían la rentabilidad sobre ventas en un 6%. Además, el análisis financiero de la propuesta reflejó un valor actual neto de S/. 55,781.51 y una tasa de retorno del 49%, con un tiempo de recuperación de 2.97 años.

Bernabé et al. (2023a) llevaron a cabo el trabajo de investigación titulado "Gestión de la eficiencia energética según ISO 50001: Un estudio de caso en la industria ladrillera" (p. 1). La investigación siguió un enfoque cuantitativo y diseño experimental, en el que se realizó una auditoría energética antes y después de ejecución del SGE. La muestra estuvo conformada por los registros de consumo eléctrico de la empresa analizada. Para la recopilación de datos, se emplearon herramientas de monitoreo del consumo energético y registros históricos de electricidad utilizada en la producción. El propósito central del estudio fue evidenciar que la aplicación de un SGE basado en la norma ISO 50001 puede mejorar la eficiencia en el uso de la electricidad y disminuir el consumo energético en la industria de fabricación de ladrillos. Para ello, se establecieron indicadores clave de desempeño energético y se evaluó la efectividad del sistema mediante la comparación de los niveles de consumo antes y después de las mejoras implementadas. Los resultados obtenidos mostraron que la aplicación del SGE permitió reducir el consumo eléctrico en un 8% mensual, lo que representó un ahorro de 43,504 kWh cada mes y una reducción anual de 522,048 kWh. Desde el punto de vista económico, esto significó un ahorro de S/ 216,806.53 (equivalente a US\$ 59,891.30). Además, se comprobó que el uso de la metodología PHVA ayudó a mejorar el aprovechamiento de la energía y minimizar el desperdicio en los procesos industriales.

Santamaria (2023) llevó a cabo el trabajo de investigación titulado "Diseño de un sistema de gestión de la energía basado en la Norma ISO 50001 para mejorar la eficiencia energética en la Molinera Sudamérica S.A.C. Lambayeque" (p. 1). En este estudio se implementó un diseño de investigación con enfoque en la normativa ISO 50001. La investigación se realizó mediante el análisis documental, utilizando una guía de análisis documental como principal herramienta para recopilar y examinar la información. El objetivo central del trabajo consistió en desarrollar un SGE fundamentado en la ISO 50001, con la finalidad de incrementar la eficiencia en el consumo eléctrico de la planta industrial. Para alcanzar este propósito, se efectuó una evaluación integral que abarcó un análisis organizacional, un diagnóstico energético y un estudio económico, permitiendo así

establecer estrategias dirigidas a la optimización del uso de la energía. Entre los hallazgos más relevantes, se identificó que la empresa carecía de un sistema eficiente de gestión energética, lo que impactaba negativamente en su rentabilidad. Los cálculos realizados determinaron que la eficiencia energética se situaba en 6.05 kWh por saco procesado, valor que se encontraba dentro de los estándares establecidos por la OLADE. Asimismo, se estimó que la implementación del SGE permitiría un ahorro económico anual de S/. 40,111.16, con un costo inicial de inversión de S/. 70,336.70, un Valor Actual Neto (VAN) de S/. 131,986.58 y una Tasa Interna de Retorno (TIR) del 54.17%, proyectando un período de recuperación de aproximadamente 2 años y 2.16 meses. Estos resultados evidenciaron la factibilidad y el impacto positivo que tendría la aplicación del sistema propuesto.

Calla y Maldonado (2023) llevaron a cabo el trabajo de investigación titulado “Diagnóstico energético como elemento de gestión energética: caso de estudio Empresa Industrial Tapia S.A.C” (p. 1). Esta investigación, de carácter descriptivo, se basó en la recopilación y análisis de los informes mensuales de consumo energético de la empresa Industrial Tapia SAC durante los años 2021 y 2022. La población de estudio estuvo compuesta por dicha empresa, y para la recolección de datos se recurrió a la técnica de análisis documental de facturas y recibos energéticos. Además, se utilizó un checklist para evaluar el grado de cumplimiento de los lineamientos establecidos en la norma ISO 50001:2018. El propósito central de esta investigación fue establecer un diagnóstico energético en la empresa Industrial Tapia SAC a partir de los lineamientos de la norma ISO 50001:2018. Para lograrlo, se identificaron los principales focos de consumo energético dentro de la organización y se analizaron las discrepancias entre la realidad operativa y las exigencias de la normativa. Con base en estos hallazgos, se propusieron medidas orientadas a optimizar la gestión energética de la empresa. Entre los principales resultados obtenidos, se evidenció una disminución del consumo de electricidad en un 16.65% y una reducción en el uso de combustibles en un 14.38% durante el período de análisis. Estos logros se atribuyeron a mejoras en la infraestructura, la sustitución de equipos eléctricos

de menor eficiencia, la capacitación del personal en prácticas de consumo responsable y la optimización de procesos energéticos. En conclusión, el estudio reafirmó que un diagnóstico energético bien estructurado facilita la detección de oportunidades de mejora, promoviendo la reducción del consumo de recursos energéticos y fomentando un desarrollo sostenible dentro de la organización.

Nonalaya (2020) en su trabajo de investigación titulado “Modelo de gestión de la energía, para disminuir los costos productivos del horno N° 3, en la empresa UNACEM S.A.A” (p. 1), detalla el proceso de implementación de un sistema integrado de gestión de la energía alineado a la ISO 50001. En este trabajo se presentó el reporte del año 2017, donde señala que el horno representa el 12.05% del consumo total de la energía de la planta tanto eléctrica como térmica, valor de consumo muy alto comparado con las demás secciones, cabe resaltar que existen 27 secciones en planta, en el cual ya está considerado las otras líneas de producción, según el balance de energía realizado en el horno N° 3, el consumo térmico fue de 942 kcal/kg, representando el porcentaje más alto de todo el sistema de clinkerización. El propósito principal fue reducir los costos energéticos del proceso, específicamente en la línea 3. Para ello se analizó indicadores claves de consumo energético tanto térmico como eléctrico, indicadores que permitieron reducir el costo de producción del cemento; logrando mayor capacidad y margen para competir en el mercado. Por todo lo mencionado anteriormente el autor concluye que es muy importante y necesario evaluar e implementar el SGE en esta sección, además detalla el resultado de la implementación, permitiendo reducir el consumo eléctrico en 4,159,868.00 kWh y el consumo térmico en 68 kcal/kg, traduciéndose en un ahorro económico proyectado de US\$ 2,491,511.00.

Capítulo II. Marco teórico y conceptual

2.1. Marco teórico

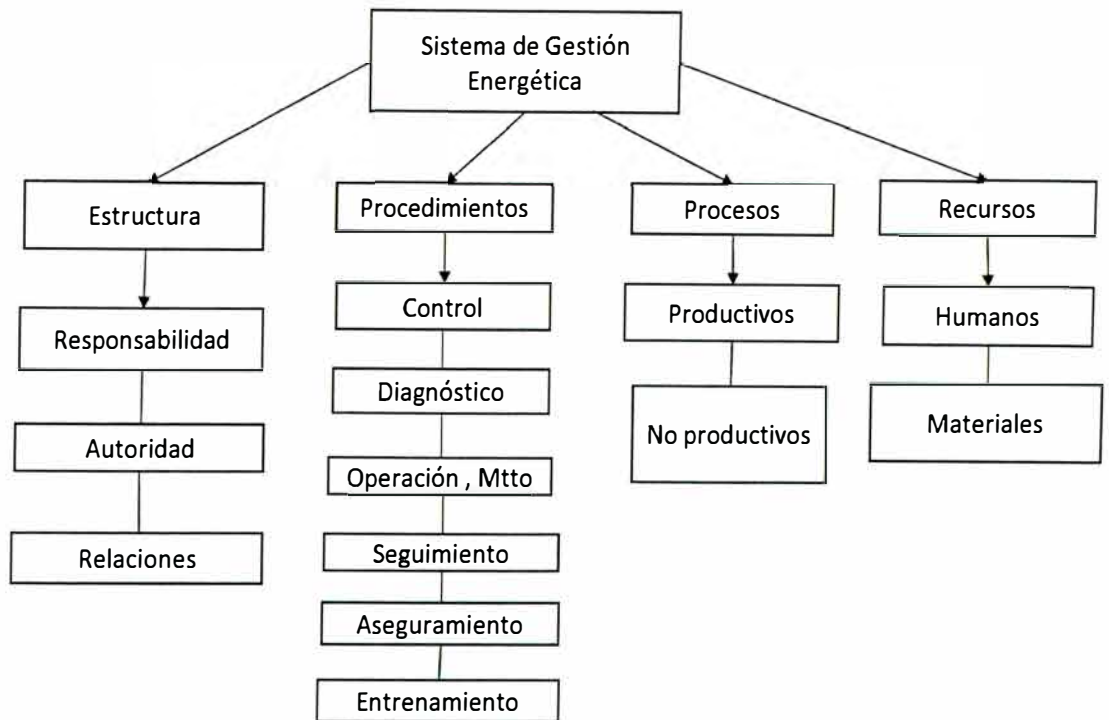
2.1.1. Sistema de gestión de energía

La gestión de energía se entiende como un enfoque estructurado dentro de la industria que abarca planificación estratégica, ejecución operativa, monitoreo, organización y cultura empresarial. Su propósito es minimizar el consumo energético y los costos asociados en todas las áreas, tanto productivas como de apoyo, además, define como un sistema compuesto por elementos interconectados que permiten formular una política energética, establecer objetivos y diseñar los procesos necesarios para cumplirlos (Nurprawito et al., 2023).

La gestión energética dentro de un SGE implica la planificación estratégica, ejecución, supervisión y optimización continua de los procesos vinculados al uso de la energía en una organización; este enfoque adopta un panorama integral de la administración de la energía, buscando maximizar la eficiencia operativa mientras se reduce el desperdicio y el impacto ambiental. Abarca diversas áreas, como la adquisición y distribución de energía, su consumo racional y la implementación de medidas para su conservación (Aouragh y Bouteldja, 2024). En la Figura 4 se observa el enfoque de un SGE desde la estructura hasta los recursos necesarios para ejecutarlo con éxito.

Figura 4

Diagrama de flujo de la gestión energética



Nota: Adaptado de "ISO 50001:2018 Energy management system implementation guide" (p. 19), por NQA, 2024".

Adoptar un Sistema de Gestión Energética representa una estrategia clave para optimizar el consumo de energía y fortalecer distintos aspectos dentro de una organización, desde la reducción de costos hasta la sostenibilidad ambiental; en efecto, al detectar y corregir desperdicios energéticos, disminuye significativamente el gasto en energía, lo que impacta positivamente en la rentabilidad empresarial (Aouragh y Bouteldja, 2024). Paralelamente, su implementación mejora la eficiencia operativa al reducir fallos e interrupciones, lo que incrementa la productividad y la capacidad competitiva, en términos ambientales, fomenta un uso más responsable de la energía, contribuyendo a la reducción de emisiones contaminantes y alineándose con los objetivos globales de sostenibilidad, además, facilita el cumplimiento normativo y permite obtener certificaciones internacionales, como la ISO 50001:2018, evidenciando el compromiso organizacional con las mejores prácticas en gestión energética (Jin et al., 2021).

En la Figura 5 se observa quienes son las partes interesadas en la implementación del sistema gestión de energía. La participación de este grupo de interés es esencial para lograr la sostenibilidad energética y reducir los costos de la organización.

Figura 5

Partes interesadas en la implementación de la gestión energética



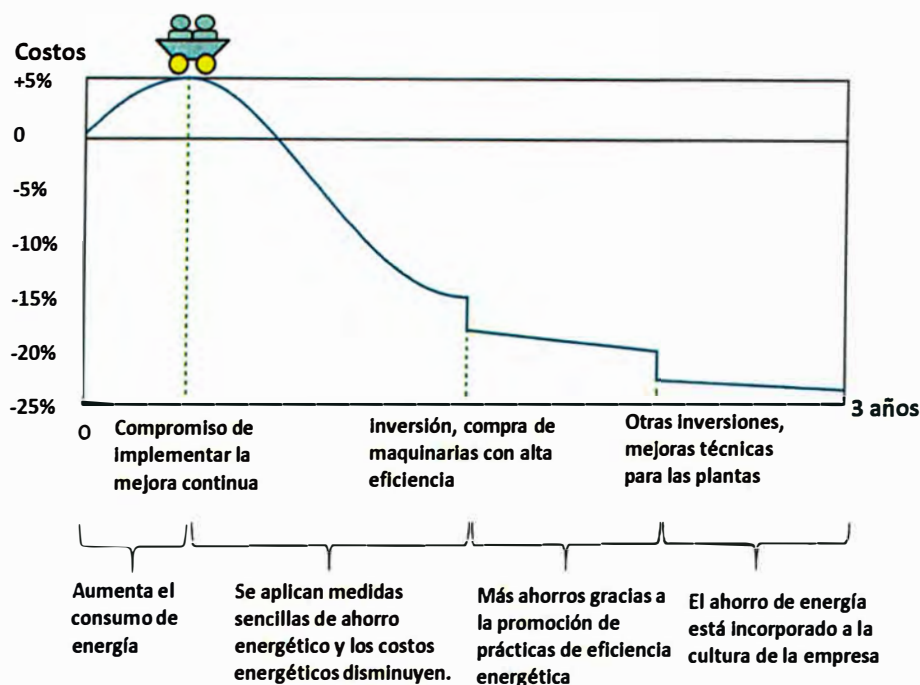
Nota: Tomado de "ISO 50001:2018 Energy management system implementation guide" (p. 13), por NQA, 2024".

Eficiencia energética. La disminución del consumo de energía y uso eficiente de la misma va alineada directamente con los objetivos empresariales, debido a que aumenta la rentabilidad de la empresa y disminuye las emisiones de gases al medio ambiente, además de contribuir a mejorar la imagen de la organización. El usar eficientemente la energía disminuye la exposición a los precios variables, reduciendo la dependencia y mejorando la capacidad de negociación con los proveedores. La mayoría de las empresas tienen dificultad para internalizar la importancia de implementar medidas para optimizar el consumo energético, sin embargo, en la industria hay muchos casos donde se demuestra que implementar un plan de gestión energética va alineado a los objetivos corporativos, teniendo como resultados mejora en la rentabilidad. Esto aplica en todas las

organizaciones tanto de pequeña escala como de gran escala. La Figura 6 muestra como las distintas estrategias de gestión de energía están relacionadas directamente con los costos de energía (FONAM, 2009).

Figura 6

Ciclo Planificar-Hacer-Verificar-Actuar de la Norma ISO 50001



Nota: Tomado de "Guía Práctica para la Implementación de un Sistema de Gestión de la Energía" (p. 22), por ONUDI, 2015, www.unido.org.

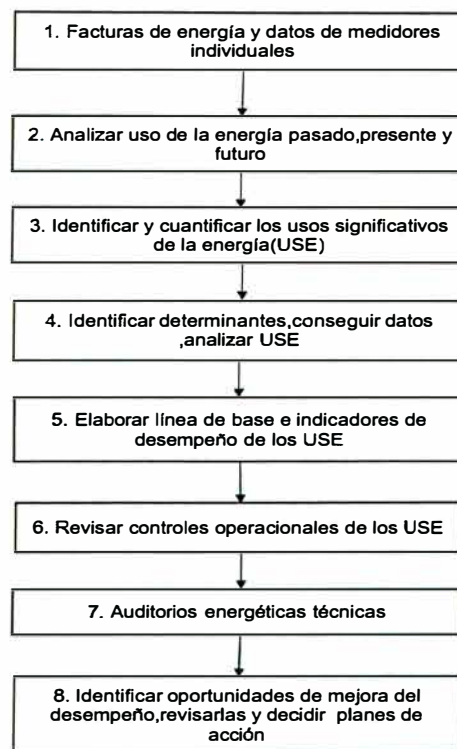
Planificación energética. Este es una etapa importante en la implementación del SGE. Es fundamental determinar el consumo energético por sección, identificar como se distribuye y cómo se utiliza. Actualmente las empresas tienen un estricto control de su estructura de costos, sin embargo, hay pocas empresas que entienden como se distribuye sus consumos energéticos. Considerando que los costos energéticos representan un gran porcentaje de los costos operativos, en comparación con otros costos.

El objetivo de esta etapa es identificar como se utiliza la energía y con ello establecer indicadores energéticos que permitan controlar los consumos. La identificación y evaluación de oportunidades de ahorro permite establecer acciones para optimizar el

consumo de energía, mediante las buenas prácticas operativas y energéticas. El establecer una línea base es importante porque permite hacer seguimiento a las mejoras y en base a los indicadores evaluar el cumplimiento de los objetivos planteados. Dentro de la planificación estrategia es necesario conocer los requisitos legales y normas técnicas. En la Figura 7 se observa la planificación del sistema de gestión de energía y como se debe realizar desde el inicio de la implementación (EREN, 2013).

Figura 7

Enfoque estructurado para gestionar y reducir el consumo de energía



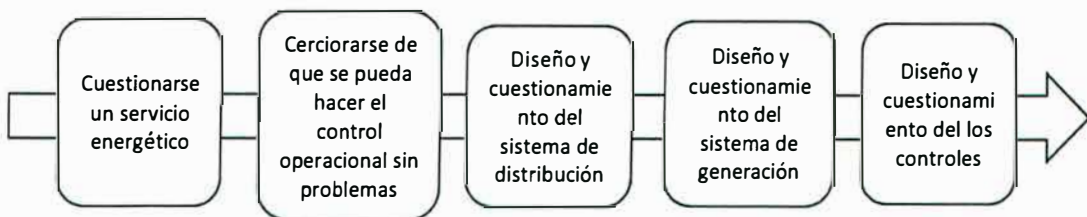
Nota: Adaptado de "Guía Práctica para la Implementación de un Sistema de Gestión de la Energía" (p. 8), por ONUDI, 2015, www.unido.org.

Diseño de la eficiencia energética. La elaboración y diseño de la eficiencia energética se basa en integrar estrategias y tecnología para optimizar el consumo energético en cualquier proceso, sin afectar la eficiencia y rendimiento. Es importante incluir el rendimiento energético desde la fase de inicial de diseño, dado que resulta ser más beneficioso y barato que incluirlo posteriormente. No se requiere más dinero para

elaborar un proceso energético más eficiente que otro menos eficiente. Si bien, la implementación de nuevas tecnologías es beneficioso para el proceso, no siempre es la mejor opción para mejorar el consumo energético. El diseño energético es un enfoque integral que relaciona todos los elementos presentes en un sistema, para maximizar el rendimiento energético y reducir el impacto ambiental. En la Figura 8 se observa el diagrama de flujo para establecer el diseño y ejecución de la eficiencia energética (ONUDI, 2015).

Figura 8

Diagrama de flujo para diseñar un sistema de eficiencia energética



Nota: Adaptado de “Guía Práctica para la Implementación de un Sistema de Gestión de la Energía” (p. 46), por ONUDI, 2015, www.unido.org.

Consumo energético y usos significativos de la energía. El consumo energético representa la cantidad de energía absorbida o emitida en el transcurso de una reacción química o un fenómeno físico. Esta energía proviene de la estructura de los enlaces químicos que unen a los átomos y moléculas en una sustancia. Cuando ocurre una reacción química, la alteración de estos enlaces genera cambios en la energía interna del sistema, los cuales pueden traducirse en la emisión de calor, luz u otras formas de energía. Un ejemplo claro es la combustión, donde la energía química almacenada en los combustibles se transforma principalmente en calor y radiación lumínica. La comprensión de estos mecanismos resulta esencial en áreas como la termodinámica química y la bioenergética, ya que facilita la evaluación y mejora del aprovechamiento energético en distintos procesos industriales y biológicos (NQA, 2024).

Según NQA (2024), la base de referencia del consumo energético es el registro histórico que permite analizar patrones de consumo de energía en un determinado período. Funciona como punto de comparación para evaluar los ahorros obtenidos tras la implementación de mejoras en eficiencia energética, mientras la evaluación energética es el proceso en el que una organización examina sus hábitos de consumo y distribución de energía. Abarca el análisis de fuentes como electricidad y gas natural, así como el inventario de los equipos y sistemas que demandan energía dentro de la empresa.

Es importante identificar cuáles son las secciones o equipos que consumen más energía en una organización, con ello se puede implementar acciones que se enfoquen en reducir esos consumos. La determinación de los USE en un proceso o equipo es clave para optimizar los consumos energéticos de la planta, dado que representan un porcentaje alto del total consumido por la empresa. Como parte del control de los USE, la instalación de medidores es necesario para hacer este seguimiento, en caso contrario se debe estimar la energía consumida mediante mediciones puntuales en campo.

Indicadores de consumo energético. Herramienta de medición utilizada para evaluar el desempeño energético de una organización. Permite cuantificar la eficiencia y detectar oportunidades de mejora en el consumo de energía. Estos indicadores se alinean a los objetivos estratégicos, los cuales son resultados medibles que una organización tiene como meta para mejorar su eficiencia energética. Estas metas están orientadas a reducir el consumo, minimizar costos y optimizar el aprovechamiento de los recursos energéticos disponibles.

Para cumplir con los objetivos estratégicos se requiere ejecutar un plan de supervisión y medición del consumo energético que sirve para registrar, evaluar y optimizar el consumo de energía. Esto puede incluir la instalación de medidores, la implementación de sistemas de monitoreo en tiempo real y la comparación del desempeño energético con otras empresas del sector. La estrategia de mejora energética es un plan estructurado que

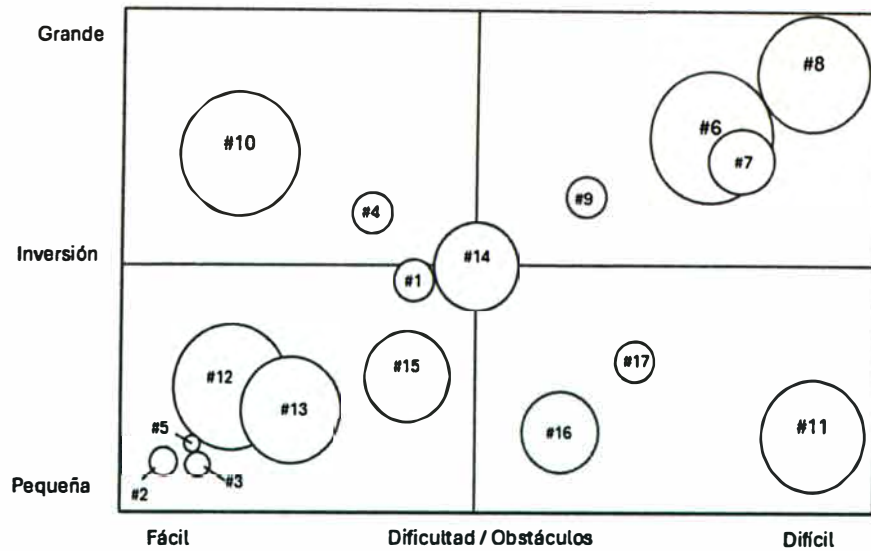
define las oportunidades de optimización del consumo energético. Contempla un calendario de acciones, responsables asignados y métodos de evaluación para medir el impacto de las iniciativas implementadas (NQA, 2024).

Estrategias operativas. Las estrategias operativas desempeñan un papel importante en el SGE, debido que permiten establecer las acciones prácticas que se van a implementar en los procesos para alcanzar los objetivos planteados. Estas estrategias deben estar alineadas a los USE, es decir, los equipos o secciones que consumen más energía en la empresa. En el caso de una empresa cementera, el horno de clinker y los molinos de cemento suelen ser los principales, debido a su alto consumo energético. La experiencia muestra que mediante las mejoras prácticas operativas se puede ahorrar entre un 25 a 50% del consumo total de energía. En un proceso normal hay diferentes formas de aplicar estrategias operativas tales como la optimización de procesos, que está enfocado en ajustar los parámetros de operación para reducir el consumo eléctrico sin afectar la data de calidad (ONUDI, 2015).

Asimismo, el mantenimiento preventivo y predictivo facilitan mantener los equipos en buena condición, evitando aumentar el consumo de energía por baja eficiencia. Dentro de las acciones de mejora se encuentra la planificación del consumo energético mediante la distribución de consumos fuera de hora punta. La capacitación del personal operativo en habilidades técnicas permite tomar mejores decisiones y hacer uso eficiente de la energía. Finalmente, el monitoreo y control son herramientas que permiten detectar anomalías o desviaciones en tiempo real, con el objetivo de reducir el consumo energético. En la Figura 9 se observa las oportunidades de ahorro en función a la cantidad, basado en la dificultad técnica y la inversión inicial, donde las burbujas que están a la izquierda inferior son las más sencillas de implementar.

Figura 9

Priorización de las oportunidades de mejora



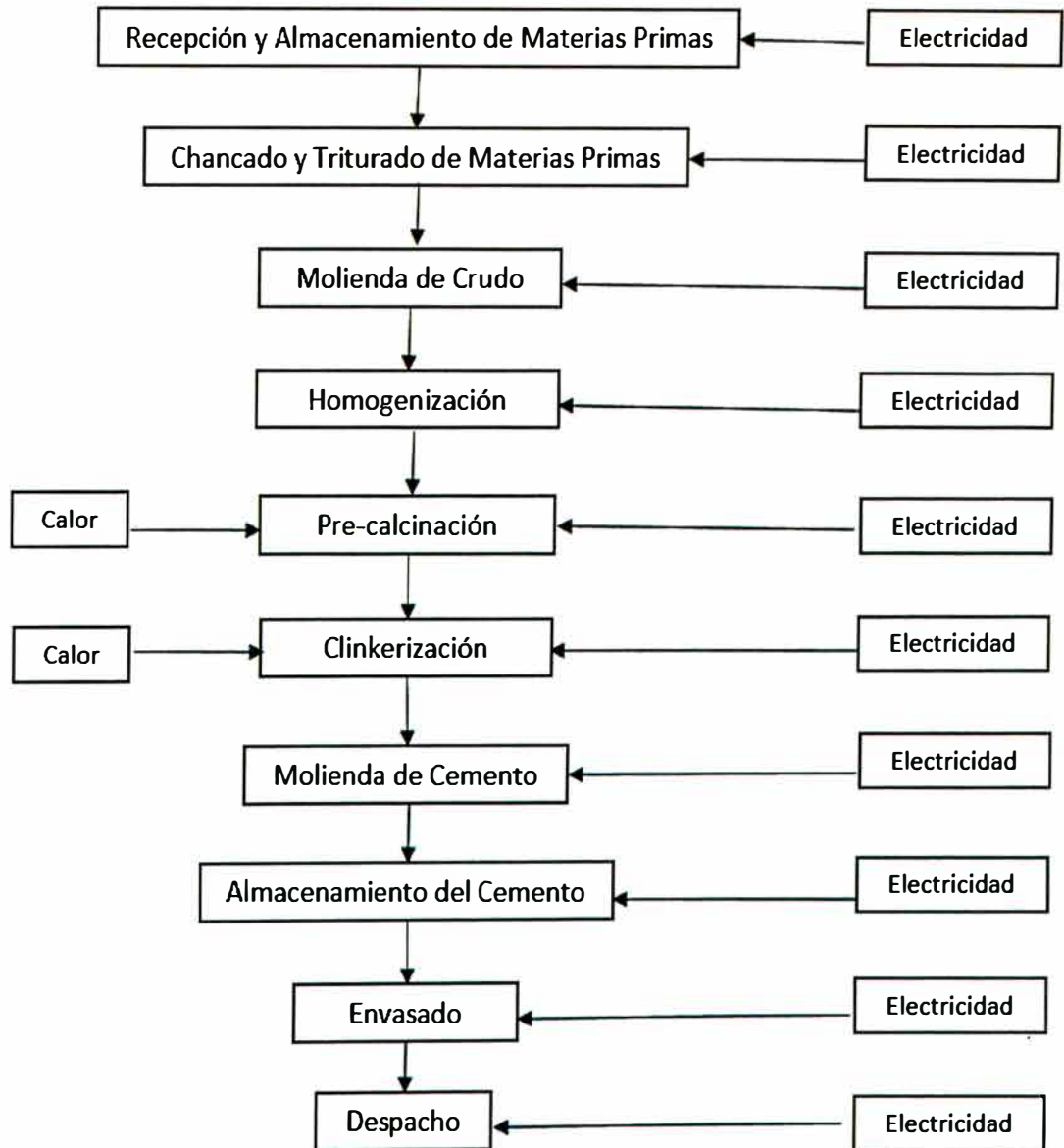
Nota: Tomado de "Guía Práctica para la Implementación de un Sistema de Gestión de la Energía" (p. 36), por ONUDI, 2015, www.unido.org.

2.1.2. La industria de cemento y la gestión de energía

La fabricación de cemento es una de las actividades industriales con mayor consumo energético a nivel global, debido a que sus procesos productivos exigen grandes volúmenes de electricidad y combustible, en efecto, este uso intensivo de energía no solo eleva los costos operativos, sino que también incrementa las emisiones de gases de efecto invernadero y el impacto ambiental (Mishra et al., 2022). En la Figura 10 se muestra el diagrama del proceso de fabricación de cemento en una planta tradicional, con el tipo de energía consumida según sección. Como se observa, todas las secciones consumen energía eléctrica, sin embargo, solo la sección de pre-calcinado y clinkerización consumen energía térmica.

Figura 10

Proceso de fabricación de cemento en una planta tradicional



Nota: Tomado de "Guía de Orientación del Uso Eficiente de la Energía y de Diagnóstico Energético-Industrias Cementeras" (p. 11), por DGEE-MINEM, 2017.

El proceso de fabricación del cemento consta de tres fases esenciales: preparación de materias primas, obtención de clínker y molienda final (ver Tabla 2); en primer lugar, la piedra caliza y la arcilla se trituran y combinan hasta lograr una mezcla homogénea en términos de composición química. Luego, antes de ingresar al horno, estos materiales atraviesan una torre de precalentamiento donde se aprovechan los gases calientes del proceso, disminuyendo así el consumo energético en la etapa siguiente; en la fase de producción de clínker, la mezcla se somete a temperaturas superiores a 1000 °C en un

horno, propiciando la formación de cristales de silicato de calcio, base fundamental del cemento. Posteriormente, el enfriamiento rápido detiene las reacciones químicas y permite recuperar parte del calor generado, optimizando la eficiencia térmica (Cantini et al., 2021b).

Tabla 2

Proceso de producción de cemento

Etapa	Operación	Equipo/Maquinaria
Etapa 1: Procesamiento de Materias Primas	1.1. Trituración	Trituradoras
	1.2. Pre-mezcla	Apiladores y recuperadores
	1.3. Molienda de materias primas	Molinos
	1.4. Mezcla	Silos de homogeneización
Etapa 2: Producción de Clinker	2.1. Precalentamiento	Torre de precalentamiento
	2.2. Calentamiento	Horno
	2.3. Enfriamiento	Enfriador
	2.4. Almacenamiento de clinker	Silos
Etapa 3: Molienda Final	3.1. Molienda final	Molinos
	3.2. Almacenamiento de cemento	Silos

Nota: Adaptado de "Energy Efficiency Improvements in Cement Industries. *Sustainability*" (p.2), por Cantini, A., Leoni, L., De Carlo, F., Salvio, M., Martini, C., & Martini, F, 2021b, *Technological* 13(7), 3810.

En la etapa de molienda, el clinker se combina con aditivos como yeso, escoria o cenizas volantes, dependiendo del tipo de cemento deseado. Durante la fabricación del clinker, también se llevan a cabo procesos adicionales, como la gestión de combustibles y el tratamiento de gases residuales para mitigar el impacto ambiental. Por tanto, cada fase demanda elevados requerimientos térmicos y eléctricos. Específicamente el piroprocesamiento en el horno de cemento es la fase más demandante, con temperaturas que pueden alcanzar los 1450 °C y un consumo energético que oscila entre el 70% y el 80% del total requerido por la planta (ver Tabla 3) (Doh y Wen, 2021).

Tabla 3

Temperaturas en distintas fases del proceso cementero

Etapa	Temperatura de entrada (°C)	Temperatura de salida (°C)
Conminución	25 (ambiente)	35
Secado	35	130
Precalentamiento	130	600
Calcinación	600	900
Clinkerización	900	1450
Enfriamiento de clínker	1450	300
Molienda de cemento	300	25 (ambiente)

Nota: Adaptado de "A systematic review on the impact of cement industries on the natural environment. *Environmental Science and Pollution Research*" (p.4), por Mishra, U, Sarsaiya, S., & Gupta, A, 2022, 29(13), 18440–18451.

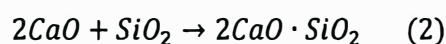
2.1.3. Tipos de hornos de clínker según su eficiencia energética

Los hornos de clínker cumplen un papel importante en el proceso de fabricación de cemento. Su función principal es transformar las materias primas como caliza, arcilla y hierro en clínker, mediante reacciones químicas con temperaturas por encima de los 1450 °C. A continuación, se muestra las reacciones de formación de clínker (Walter y Duda, 1977).

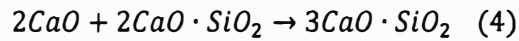
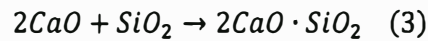
El proceso de descarbonatación de la caliza se lleva a cabo a una temperatura entre (750-900 °C), según la siguiente ecuación 1 de la reacción:



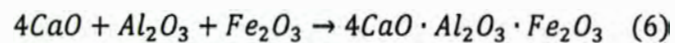
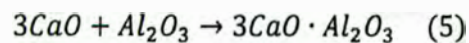
El proceso de formación del silicato dicálcico se lleva a cabo a una temperatura entre (950-1200 °C), según la siguiente ecuación 2 de la reacción:



El proceso de formación del silicato tricálcico se lleva a cabo en 2 etapas a una temperatura entre (1250-1300 °C), según las siguientes ecuaciones 3 y 4 de las reacciones:



El proceso de formación del aluminato tricálcico y ferroaluminato tetracálcico se lleva a cabo a una temperatura entre (1250-1450 °C), según las siguientes ecuaciones 5 y 6 de las reacciones:



La fase líquida se forma entre 1250 a 1450 °C y es el medio en donde suceden las reacciones químicas, su participación es importante para acelerar la formación de las fases principales del cemento. Las principales fases del cemento son $2CaO \cdot SiO_2$ (C_2S), $3CaO \cdot SiO_2$ (C_3S), $3CaO \cdot Al_2O_3$ (C_3A) y $4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$ (C_4AF), su proporción depende del tipo de cemento que se quiere producir (Prato, 2007).

De acuerdo con su eficiencia energética y capacidad, se tiene varios tipos de procesos de hornos rotatorios en la producción de clinker, cada uno con una característica específica. En la tabla 4, se presentan los principales tipos de procesos usados en la industria cementera. Los procesos vía húmeda y semihúmeda son tecnologías antiguas que pueden llegar a consumir hasta 6,000 MJ/t, debido a que en su proceso incorporan materia prima con alta humedad de hasta 40% (Castillo et al., 2022). Actualmente la mayoría de cementeras utilizan el proceso por vía seca con precalentador y calcinador, por su eficiencia energética, llegando a reducir el consumo térmico hasta 2,900 MJ/t.

Tabla 4*Tipos de procesos para la fabricación de clinker*

Ítem	Tipo de proceso	Consumo específico (MJ/t de clinker)
1	Vía seca con pre-calentador de ciclones y calcinador	2,900-3,200
2	Vía seca con pre-calentador de ciclones	3,100-4,200
3	Vía húmeda o semihúmeda	3,300-4,500
4	Hornos verticales	4,500-5,000
4	Hornos largos vía seca	Hasta 5,000
5	Horno largos vía húmeda	5,000-6,000

Nota: Tomado de "Guía de Orientación del Uso Eficiente de la Energía y de Diagnóstico Energético-Industrias Cementeras" (p. 21), por DGEE-MINEM, 2017.

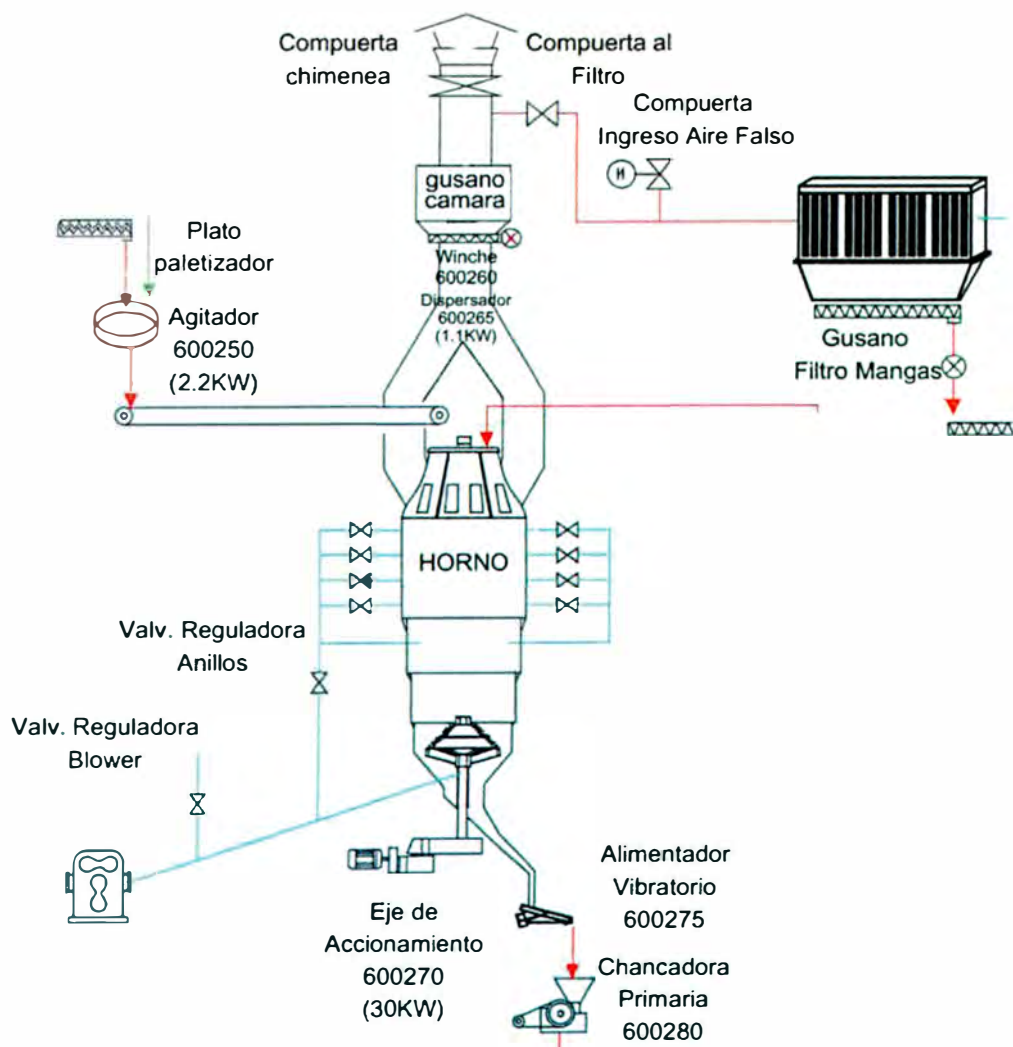
Actualmente los hornos más utilizados en la industria cementera son los hornos horizontales rotatorios con precalentar y calcinador, debido a su bajo consumo térmico, tal como se observa en la Tabla 4. En algunos países se utilizan los hornos verticales, los cuales tienen la ventaja de ocupar menos espacio y menor capacidad de producción. A continuación, se detalla los principales procesos de clinkerización utilizados en la industria cementera:

Horno vertical. Los hornos verticales fueron los primeros en ser utilizados para la producción de clinker. El proceso consiste en alimentar la materia prima mezclado con el carbón por la parte superior y en contracorriente el flujo de aire requerido para la combustión. Por otro lado, el clinker se descarga por el otro extremo, el cual es enfriado rápidamente para ser enviado a los silos de almacenamiento. Estos hornos se caracterizan por su diseño compacto y por ocupar menos espacio, se utiliza en plantas que requieran producir a menor escala <1,500 t/d o de forma intermitente. Por sus características y diseño, el consumo energético es más alto y presenta mayor dificultad para producir clinker de mejor calidad. Una de las grandes desventajas de este tipo de horno son la baja capacidad de producción, alto consumo energético y altas emisiones específicas de CO₂.

En la Figura 11 se observa las partes principales del horno vertical, principalmente los ingresos y salidas de material. Asimismo, el ingreso de aire proveniente de un ventilador, el cual actúa como medio de enfriamiento del clinker y es el encargado de entregar el oxígeno requerido para la combustión.

Figura 11

Horno vertical de clinker

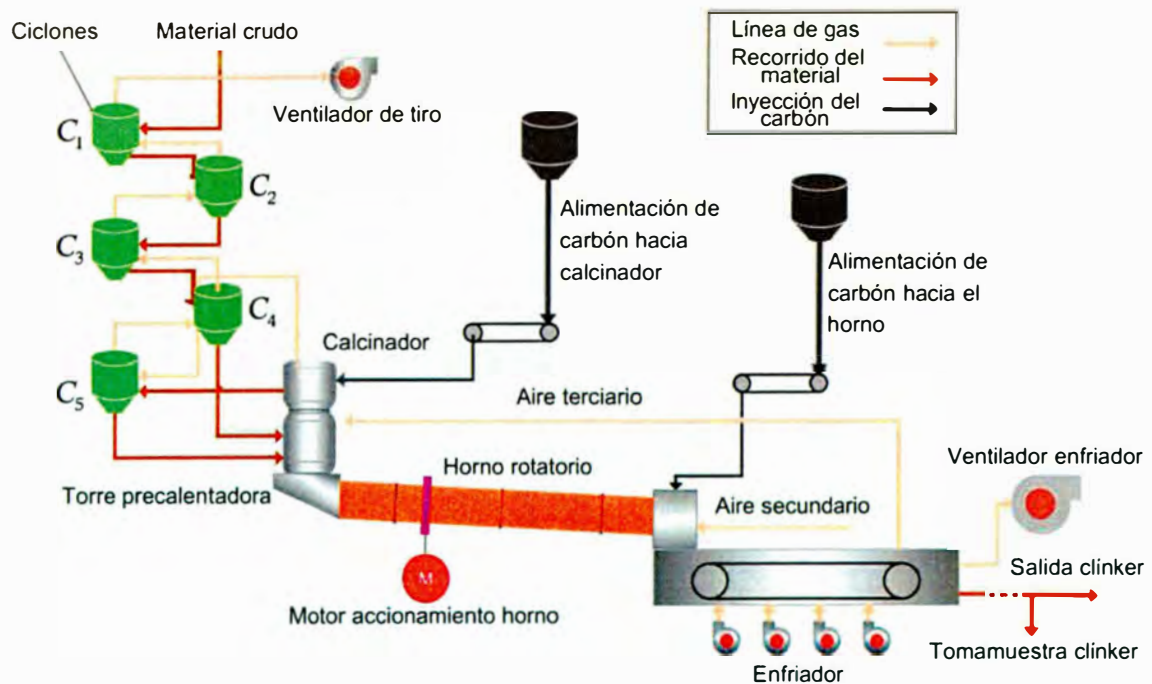


Nota: Adaptado de *Horno de eje*, por AGICO CEMENT, 2025, <https://cementplants.es/35linker-production/shaft-kiln/>.

Horno rotatorio con pre-calentador. El horno rotatorio con pre-calentador es usado ampliamente en varias plantas en el mundo, aunque tiene algunas limitaciones, su diseño y características permiten tener mayores capacidades de producción y menor consumo energético que los hornos verticales, además de menores emisiones de CO₂ al ambiente. A diferencia de lo hornos verticales, el consumo energético de los hornos rotatorios es hasta 30% menor, mejorando la eficiencia térmica. El proceso en un horno rotario con pre-calentador consiste en alimentar la harina cruda a un intercambiador de calor, que está compuesto por 4 a 5 ciclones y mediante intercambio de calor con los gases de combustión en contracorriente, lograr aumentar la temperatura del material hasta el rango de 650 a 750 °C, iniciando el proceso de descarbonatación, con una eficiencia de conversión de hasta 40% (ARGOS, 2024). Este producto poco calcinado entra al horno rotatorio, el cual es el encargado de subir la temperatura de la harina cruda de 750 °C a 1450 °C, esto se logra con el calor entregado por la combustión del carbón. Finalmente, el clinker producido se enfría bruscamente en un enfriador de satélites, planetario o de parrilla desde 1450 °C hasta 200 °C y posteriormente ser transportado a los silos. La desventaja de este tipo de hornos es que al no tener calcinador su eficiencia de descarbonatación en el pre-calentador es menor que un horno con calcinador, requiriendo mayor consumo energético (Castillo et al., 2022). En la Figura 12 se observa el proceso de producción de clinker de un horno rotatorio con pre-calentador, en donde se muestra el ingreso de material crudo y salida de clinker del enfriador, además los flujos de aire necesario para la combustión del carbón y la recuperación de calor.

Figura 12

Horno rotatorio con pre-calentador



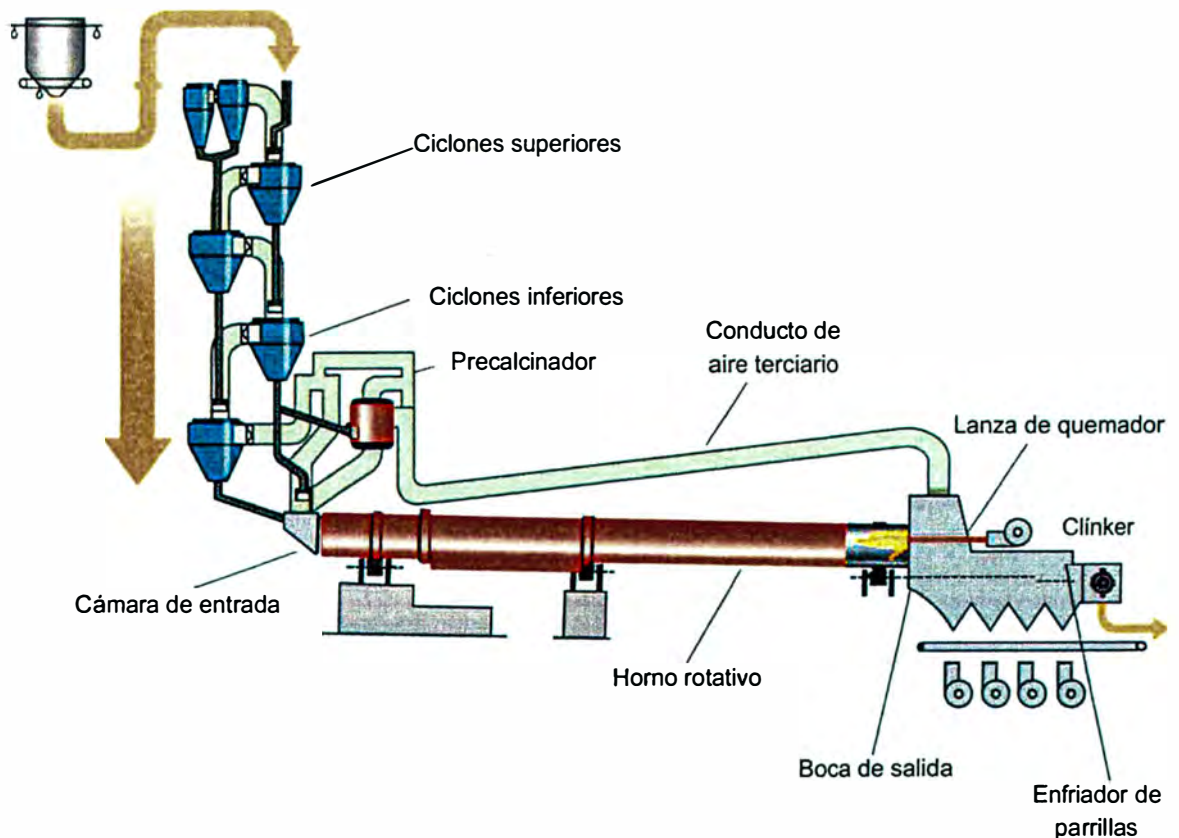
Nota: Extraído de “Horno cementero rotatorio: una revisión al control mediante sistemas expertos” (p. 5), por Castillo, J., Ospina, M., & Ortiz, P, 2025, *TecnoLógicas*, 25(55), e2391.

Horno rotatorio con calcinador. El horno rotatorio con calcinador es el más usado actualmente en la industria para producir clinker, su diseño y características permite tener mayores capacidades de producción y menor consumo energético, además de menores emisiones de CO₂ al ambiente. A diferencia de los hornos rotatorios sin calcinador, el consumo energético es hasta 15% menor, mejorando la eficiencia térmica y calidad del clinker. El proceso en un horno rotatorio con calcinador consiste en alimentar harina de crudo a un intercambiador de calor, compuesto por 4 a 5 ciclones y un calcinador. Mediante intercambio de calor con los gases de combustión en contracorriente, aumentar su temperatura hasta llegar al rango de descarbonatación de la caliza de entre 750 °C a 950 °C, con una eficiencia de conversión de entre 85 a 95% (ARGOS, 2024). Este producto entra al horno rotatorio, subiendo la temperatura de la harina cruda de 950 °C a 1,450 °C, esto se logra con el calor entregado por la combustión del carbón. Finalmente, el clinker

producido se enfría bruscamente en un enfriador de parrilla o planetario dependiendo de la tecnología, desde 1,450 °C hasta alrededor de 100 °C (Castillo et al., 2022). Para posteriormente ser transportado a los silos (Carbosystem, 2025). En la Figura 13 se observa el proceso de producción de clinker de un horno rotatorio con calcinador, en donde se muestra el ingreso de material crudo, el proceso de descarbonatación del calcinador y salida de Clinker del enfriador, además los flujos de aire necesario para la combustión del carbón y la recuperación de calor.

Figura 13

Horno rotatorio con calcinador



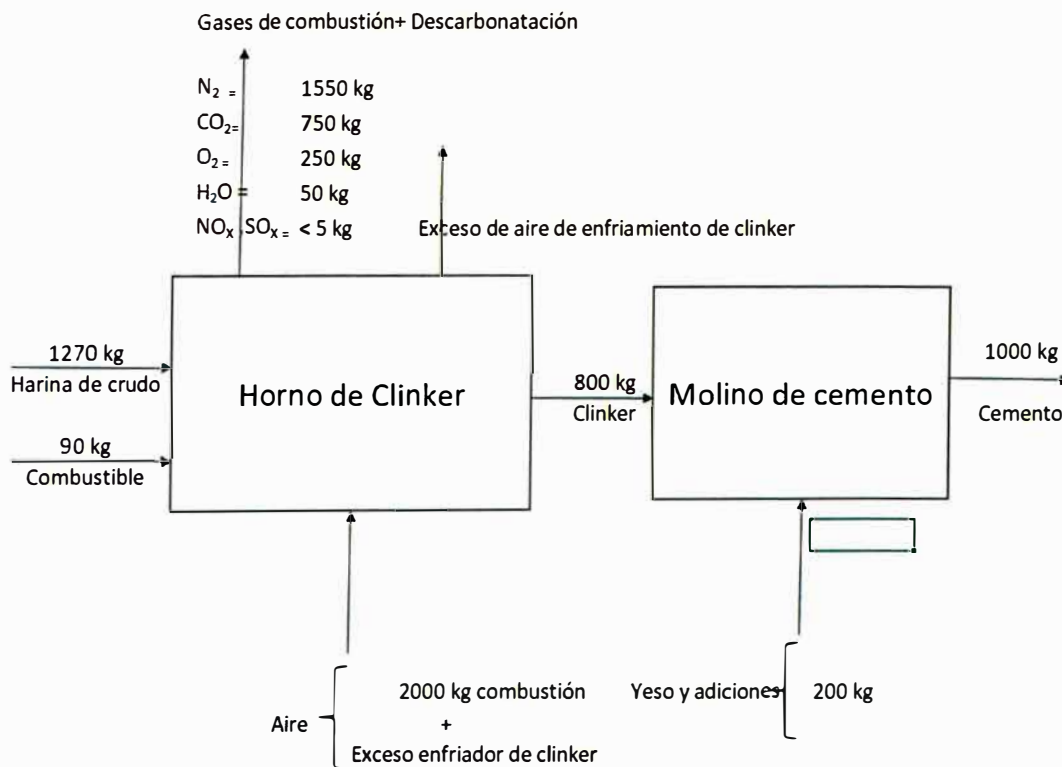
Nota: Extraído de *Tipos de hornos industriales*, Carbosystem, 2025, <https://carbosystem.com/tipos-de-hornos-industriales/>.

2.1.4. Balance de masa y energía en un sistema de clinkerización

El balance de masa y energía en un sistema de piro-proceso es importante para identificar y optimizar los flujos de masa y energía. Verificar el flujo correcto de las balanzas es fundamental para asegurar que se cumpla las dosificaciones requeridas y entregar un producto conforme. Entre las principales razones para ejecutar el balance de masa y energía en un sistema de clinkerización es identificar las pérdidas de energía, corregir y reducir el consumo de combustible, además de reducir las emisiones de material particulado al exterior. Respecto a las condiciones operativas, el balance permite detectar fugas o mal funcionamiento de los equipos, mejorando las condiciones de trabajo para los operadores. En la Figura 14 se muestra el balance de masa en un horno y molino de cemento en una planta tradicional, como flujos de entradas se tiene principalmente materias primas, combustible y aire para la combustión. Estos flujos reaccionan en conjunto a temperaturas elevadas para producir clinker y liberar como subproducto gases de combustión al ambiente (MINEM, 2017).

Figura 14

Balance de masa en el proceso de producción de clinker y cemento

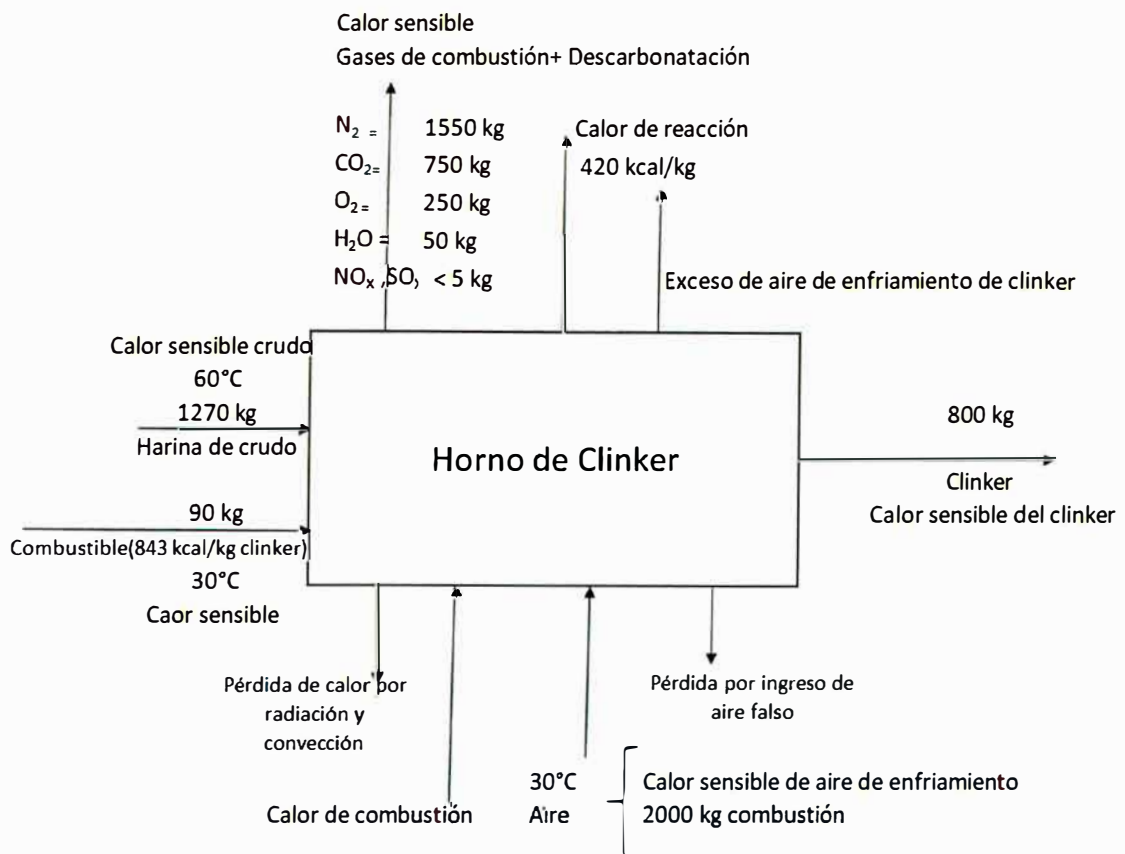


Nota: Tomado de "Guía de Orientación del Uso Eficiente de la Energía y de Diagnóstico Energético-Industrias Cementeras" (p. 16), por DGEE-MINEM, 2017.

En la Figura 15 se muestra un horno de clinker cuyo consumo térmico específico es 850 kcal/kg clinker y tiene una relación crudo-clinker de 1.587. Se observa que la combustión del combustible genera 843 kcal/kg de clinker, representando el 99% de calor total requerido para la clinkerización, mientras que el calor de reacción para producir el clinker es de 420 kcal/kg clinker. Este valor representa el 49% del calor total que ingresa al sistema.

Figura 15

Balance de energía en el proceso de producción de clinker



Nota: Tomado de "Guía de Orientación del Uso Eficiente de la Energía y de Diagnóstico Energético-Industrias Cementeras" (p. 16), por DGEE-MINEM, 2017.

2.2. Marco conceptual

2.2.1. Norma internacional ISO 50001

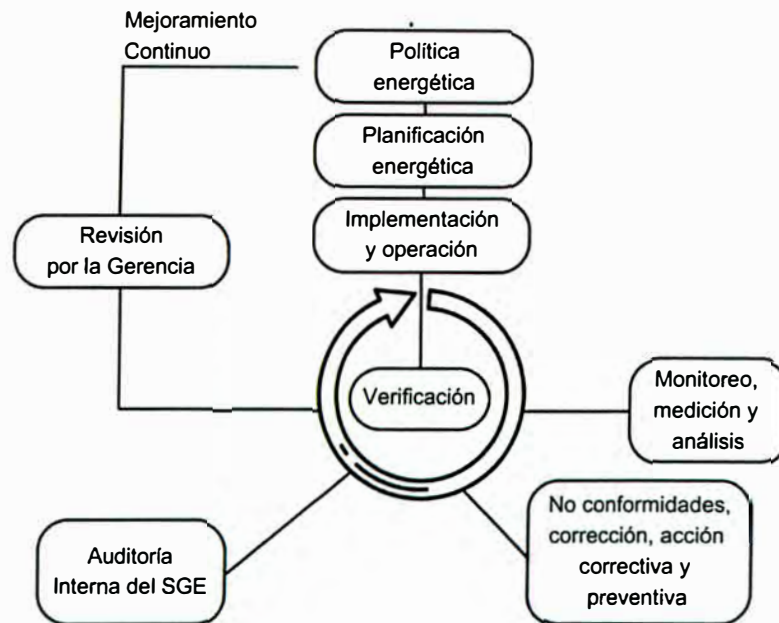
La ISO 50001, que define los criterios para el SGE, se originó en 2011, más adelante, en 2018, se lanzó una versión revisada que adoptó la estructura de alto nivel, un marco unificado utilizado en otras normativas ISO, lo que simplificó su integración con estándares como la ISO 9001 y la ISO 14001. La norma ISO 50001:2018 entrega un marco voluntario para gestionar y optimizar el consumo energético en las organizaciones, además, define los lineamientos para diseñar, ejecutar y mejorar continuamente un SGE promoviendo un uso más eficiente de los recursos. Esta normativa fomenta la adopción de procesos estratégicos que impulsan la eficiencia energética a largo plazo (IMO, 2016).

Su alcance incluye la evaluación del uso de energía a través de auditorías y políticas específicas, la medición y registro del consumo, así como la optimización en la selección y operación de equipos y procesos energéticos, también enfatiza la importancia de diseñar estrategias de gestión energética y supervisar variables que influyan en el desempeño energético. Es una norma adaptada para sectores como manufactura, transporte, petróleo y gas, su adopción responde a normativas vigentes, iniciativas de sostenibilidad corporativa y ventajas económicas derivadas de la reducción del gasto energético y las emisiones de CO₂. basada en el ciclo de mejora Planificar-Hacer-Verificar-Actuar, ISO 50001 se alinea con estándares como ISO 9001, ISO 14001 e IMO SEEMP, facilitando su integración en sistemas de gestión preexistentes (IMO, 2016).

Según Rodríguez (2021) un aspecto clave de este estándar es el desarrollo de un ciclo de gestión que parte de la formulación de una política energética, sobre la cual se construyen indicadores de desempeño que deben definirse durante la fase de planificación y supervisarse en la etapa de verificación. Estos indicadores permiten evaluar el uso de la energía, identificar oportunidades de optimización y aplicar medidas que mejoren la eficiencia energética, asegurando además que el sistema cumpla con los requisitos establecidos (ver Figura 16).

Figura 16

Ciclo de gestión de energía ISO 50001

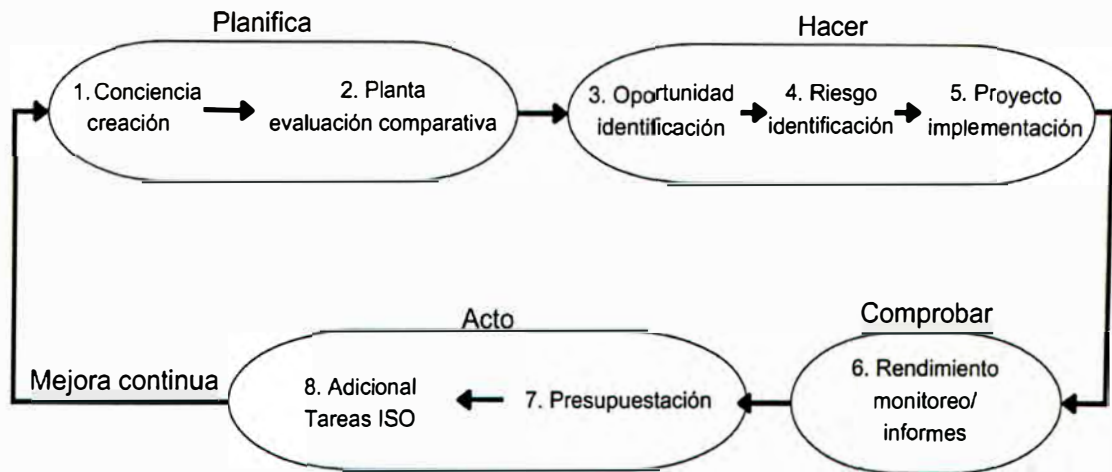


Nota: Adaptado de *ISO 50001: Sistema de Gestión Energética*, Rodríguez, M, 2021, Geoinnova, <https://geoinnova.org/blog-territorio/iso-50001-sistema-de-gestion-energetica/>.

La implementación de la norma ISO 50001 para un sistema de gestión energética (EnMS) sigue el ciclo Planificar-Hacer-Verificar-Actuar (PDCA), enfocado en la mejora continua del rendimiento energético (ver Figura 17). Este proceso abarca varias etapas clave: la identificación del contexto y la formulación de una política energética, la planificación de objetivos y métricas de seguimiento, la ejecución de estrategias de optimización, la verificación mediante auditorías y el ajuste continuo a través de medidas correctivas. El proceso comienza con la identificación del contexto energético de la organización, la formulación de una política energética alineada con los objetivos estratégicos y la realización de una evaluación energética para detectar los USE y áreas de mejora. Durante la planificación, se definen objetivos y metas energéticas, se establecen indicadores de desempeño) y se crea un plan para la recolección de datos sobre el consumo de energía (NQA, 2021).

Figura 17

Sistema de gestión energética bajo ISO 50001



Nota: Extraído de "Results and prospects of applying an ISO 50001 based reporting system on a cement plant" (p. 9), por Pelser, W, Vosloo, J, & Mathews, M, 2018a, *Journal of Cleaner Production*.

En la fase de implementación, la organización lleva a cabo acciones para optimizar el consumo energético, que incluyen la compra de equipos eficientes, la mejora de procesos y la incorporación de energías renovables. Además, se garantiza el óptimo funcionamiento de las instalaciones y la formación del personal, asegurando el estricto cumplimiento de los estándares establecidos en el EnMS. Posteriormente, en la etapa de verificación, se efectúan auditorías internas, se analizan los resultados de los EnPIs y se comparan con la línea base energética para evaluar el progreso. También, durante la fase de mejora, se revisan los resultados con la alta dirección y se adoptan medidas correctivas y preventivas para optimizar la eficiencia energética (NQA, 2021).

En el estudio de Pelser et al. (2018a), aplicado a una empresa cementera, el sistema de gestión de energía implementado genera informes automáticos con periodicidad semanal y mensual para evaluar el desempeño energético de la planta, proporcionando datos esenciales para optimizar su eficiencia. Siguiendo el enfoque del ciclo PDCA, estos reportes permiten reajustar metas en función del historial de rendimiento y comparar indicadores clave con valores de referencia. Su estructura se basa en la

detección de riesgos y oportunidades de mejora, abarcando un análisis detallado de los principales consumidores de energía, el costo y consumo eléctrico, la producción, las pérdidas energéticas y la evolución del consumo y los gastos en distintos periodos.

Además, incluye el monitoreo de factores críticos, como el aprovechamiento de tarifas horarias para reducir costos, el funcionamiento innecesario de equipos auxiliares y las discrepancias en los índices de consumo frente a los parámetros de referencia, facilitando la toma de decisiones estratégicas para una gestión energética más eficiente en la planta cementera (Pelser et al., 2018a).

Algunos de los indicadores que se pueden usar en plantas cementeras según Pelser et al. (2018a) son: Energía total por clinker producido, que representa la energía térmica consumida por el proceso de clinkerización con relación a las toneladas de clinker producida y es expresado en kcal/t clinker, asimismo la energía total por cemento producido que representa la energía eléctrica consumida en la molienda de cemento con relación a las toneladas de cemento producido y es expresado en kWh/t cemento. También se tiene indicadores de costos, entre los principales tenemos el costo de producción por tonelada de cemento y es expresado en \$/t cemento.

La norma requiere que la organización documente todo el proceso de gestión, mantenga registros detallados sobre el consumo energético y el desempeño, y cumpla con las regulaciones vigentes a través de auditorías periódicas (NQA, 2021).

Para mitigar la demanda energética, se han desarrollado diversas estrategias de eficiencia energética, entre las más relevantes se encuentran la ejecución de sistemas de recuperación de calor residual, la optimización de la molienda y la incorporación de combustibles alternativos y materias primas sostenibles. Asimismo, mejorar la eficiencia en la producción de clinker se ha convertido en una prioridad para reducir el impacto ambiental y los costos operacionales, en etapas como el precalentamiento y la calcinación, donde las temperaturas varían entre 130 °C y 900 °C, el aprovechamiento del calor residual

representa una oportunidad clave para reducir pérdidas energéticas y mejorar la eficiencia térmica (Sahoo et al., 2022a).

2.2.2. Estrategias operativas relacionadas con el consumo energético

Las estrategias operativas son acciones que están dentro de la gestión de energía y permiten mejorar el desempeño energético del proceso. Estas estrategias se alinean con la ISO 50001, la cual establece una metodología basada en el uso eficiente de la energía y la mejora continua (ONUDI, 2015). En la Tabla 5 se muestra la relación entre las estrategias operativas y el consumo energético en el horno de clinker y molino de cemento.

Tabla 5

Relación de las estrategias operativas con el consumo energético

Estrategia operativa	Aplicación en el horno de clinker (Consumo Térmico)	Aplicación en el molino de cemento (Consumo Eléctrico)
Optimización de procesos	Temperaturas de sinterización, flujo de aire, apertura del aspirador y producción	Ajuste del aspirador, velocidad del separador, cantidad de agua, flujo de aditivo y nivel de llenado de material.
Mantenimiento predictivo y preventivo	Prevención de ingreso de aire falso, inspección de ladrillo refractario y limpieza de costra.	Revisión de reductores, motores, sistema de lubricación y chumaceras.
Gestión de la demanda energética	Reducción del consumo de combustible en hora punta	Reducción del consumo de electricidad en hora punta para minimizar los costos.
Capacitación del personal operativo	Entrenamiento en operación de hornos y control operativo	Entrenamiento en operación de molinos y cambio de placas
Control y monitoreo	Monitoreo a las temperaturas, presiones, concentraciones de gases y datos de calidad	Seguimiento al consumo específico de energía, rendimiento y valores de vibración
Uso de combustibles alternativos	Sustitución parcial del carbón con biomasa	No hay iniciativa
Automatización de procesos	Automatización del ingreso de combustible, ingreso de aire y del flujo de alimentación para mantener la condición óptima	Automatización del sistema de dosificación de aditivo, alimentación y agua.

Nota: Adaptado de "Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for Cement Making Managers", Worrell, E, y Galitsky, C, 2008, In *ENERGY STAR* (pp. 1–75). ENERGY STAR.

2.2.3. Estrategias de ahorro en las secciones de hornos y molinos

Según MINEM (2017), la sección de hornos y molino de cemento representa el 60% al 70% del consumo total de energía, por lo que es importante conocer las estrategias actuales utilizadas en la industria cementera para optimizar este consumo. A continuación, se muestran los enfoques principales para mejorar la eficiencia energética de los procesos en el horno de Clinker y molino de cemento:

Proceso de clinkerización. El horno de clinker consume alrededor del 96% del consumo térmico total de la planta. A continuación, se presentan algunas estrategias actuales para reducir el consumo de energía en la sección de clinkerización.

Sistema de mezcla eficiente. La eficiente homogenización de materias primas es importante para producir un clinker de calidad y en consecuencia un cemento óptimo. Las materias primas deben ingresar al horno de manera uniforme con la mínima variabilidad en la composición química, esto influye en la disminución del consumo térmico de los hornos. Para mezclar las materias primas, los silos que descargan por gravedad consumen menos energía que los silos que tienen un sistema de aire fluidificado. Según la literatura un óptimo sistema de mezclado puede generar un ahorro de entre 1.4 a 4 kWh/t en el consumo eléctrico y de 0.02 a 4.30 GJ en el consumo térmico (Sahoo et al., 2022).

Uso de molinos verticales de rodillos. Los sistemas tradicionales de molienda se realizan en molinos de bolas, sin embargo, se puede tener un potencial ahorro de energía eléctrica, implementando un molino vertical de rodillos de alta eficiencia. Se estima que el uso de esta tecnología puede generar un ahorro de 6 a 7 kWh/t, adicionalmente, el uso de la energía residual proveniente de los hornos para secar las materias primas previo al ingreso a los hornos puede generar un ahorro de consumo térmico de 0.08 a 0.114 GJ.

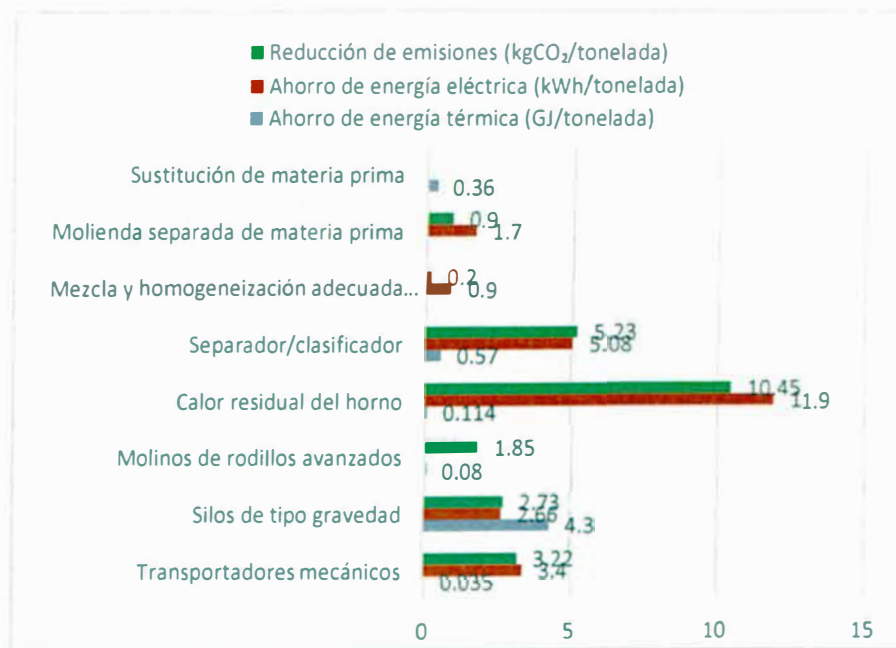
Conversión de separador de alta eficiencia. Los separadores son los encargados de separar las partículas gruesas del producto saliente del molino, retornándolo para su remolienda, por lo que usar separadores de alta eficiencia puede

contribuir a ahorrar alrededor de 2.8 a 3.7 kWh/t, dado que, ya no va a ser necesario remoler y por ende mejorar el rendimiento. Actualmente ya se cuenta con separador o clasificadores de cuarta generación, con capacidad para reducir al rango de 3 a 5% el retorno al molino. (Sahoo et al., 2022).

Uso eficiente del aire comprimido. El aire comprimido se utiliza para el transporte neumático de cemento y algunas materias primas, además sirve como medio para fluidificar el material en los silos, evitando apelmazamiento y atoros por compactación. El uso de aire comprimido requiere un alto consumo de energía eléctrica alrededor de 4 a 9% de consumo total de planta, por lo que hacer uso eficiente de este tipo de energía mediante un plan de inspección y auditorías, puede permitir ahorrar alrededor de 0.3 a 0.5 kWh/t. En la Figura 18 se observa el ahorro energético gracias a las mejoras aplicadas al proceso de preparación de la harina cruda.

Figura 18

Ahorro energético en la preparación de materias primas



Nota: Tomado de "Review on energy conservation and emission reduction approaches for cement industry. *Environmental Development*" (p. 7), por Sahoo, N., Kumar, A., & Samsher, 2022^a, 44, 100767.

Mejora en la capacidad de aislamiento térmico de los refractarios en el horno.

Un gran porcentaje de calor se pierde al ambiente mediante la superficie de los hornos, esto sucede por el mecanismo de radiación y convección. La correcta elección de ladrillos y concretos refractarios se seleccionan en base a los tipos de materias primas a utilizar, así como las características del combustible y las condiciones de funcionamiento del equipo. Cada zona del horno se comporta de forma distinta, por lo que es esencial instalar los refractarios de acuerdo con el comportamiento térmico y químico del proceso. Todas estas acciones pueden permitir ahorrar alrededor de 0.12 a 0.63 GJ/t (Sahoo et al., 2022).

Mejora en el sistema de enfriamiento en el proceso de producción de clinker.

El enfriamiento del Clinker se realiza en enfriadores tipo planetarios, satelitales, rotativos, de parrilla fija y móvil, la eficiencia térmica del sistema de clinkerización depende mucho de la eficiencia del enfriador, dado que, la recuperación de calor es esencial para la óptima formación de la flama y el intercambio de calor. La eficiencia de los enfriadores ha mejorado en los últimos años, maximizando la recuperación de calor con el menor consumo energético, Esto mediante la modificación del diseño de la parrilla, permitiendo mayor intercambio entre el aire y el Clinker. Adicional se tiene mejor distribución de aire, asegurando el flujo uniforme en todo el sistema, sumado al control inteligente que permite monitorear y controlar el proceso en tiempo real, mediante modelos de predicción y optimización. El uso de esta tecnología de alta eficiencia permite disminuir en un 8% el consumo térmico del horno, reduciendo el consumo específico de 0.19 a 0.30 GJ/t.

Modernización del sistema de precalentamiento con 5 etapas y calcinador. La torre pre calentadora es la encargada de generar el intercambio térmico en contracorriente entre los gases calientes y la harina cruda para producir Clinker. Esta sección consume alrededor del 60% del consumo térmico de planta. Por lo que optar por esta tecnología de 4 o 5 etapas con calcinador en comparación con un sistema de 1 o 2 etapas, permite mejorar la eficiencia de intercambio, reduciendo el consumo térmico. Adicional a la reducción de la caída de presión y por ende la potencia del ventilador principal de

aspiración. La implementación de ese sistema multietapa puede permitir disminuir el consumo térmico de 0.73 a 0.9 GJ/t (Sahoo et al., 2022).

Mejora del sistema de combustión del horno. El horno de Clinker consume alrededor del 40% del consumo térmico total de la planta. Los quemadores actuales tienen un sistema de combustión indirecto en el cual el combustible y el aire no entra directamente al horno, el cual permite reducir el consumo térmico en 0,015 a 0.22 GJ/t. Adicionalmente los quemadores modernos están adaptados para quemar combustibles alternativos como biomasa, combustibles derivados de maderas, residuos urbanos sólidos y otros residuos reciclados. El reemplazo de estos combustibles en lugar del carbón puede permitir reducir hasta 16% las emisiones de CO₂ al ambiente.

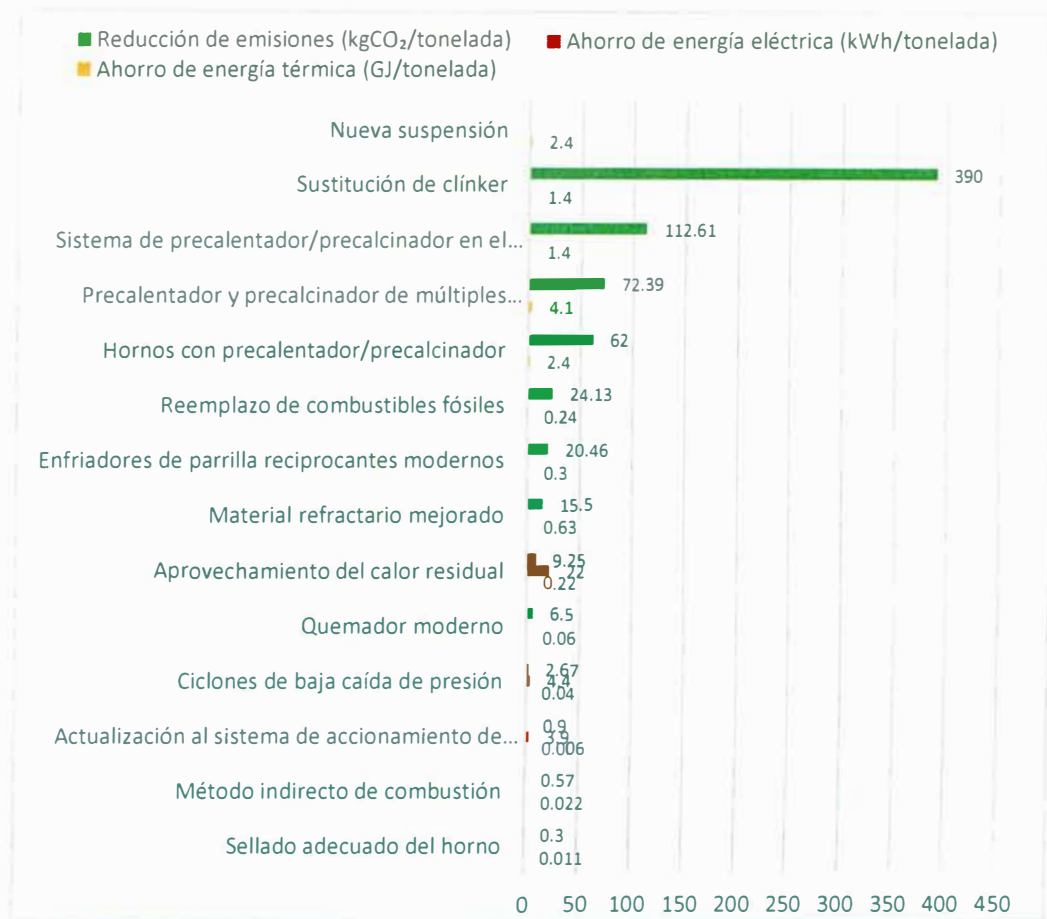
Pre calentador con ciclones de baja caída de presión. Los ciclones son equipos para separar las partículas de la harina cruda de los gases calientes, esto mediante el principio físico de la fuerza centrífuga. La eficiencia de separación depende del diseño y geometría del ciclón. El principio de funcionamiento se basa en la entrada tangencial del flujo de gases con material, la geometría del ciclón permite que el flujo cambie de dirección y envíe las partículas a la pared del ciclón y el gas limpio siga su flujo natural. Este diseño de ciclón puede reducir el consumo térmico en 0.02 a 0.04 GJ/t y el consumo eléctrico en 0.66 a 4.44 kWh/t.

Uso de energía residual proveniente de los hornos. El horno y el enfriador de Clinker generan gases calientes con temperaturas de en el rango de 250 a 350 °C. Estos gases pueden ser utilizados para secar las materias primas tales como el carbón y arcilla y en la generación de energía, previo acondicionamiento con equipos clasificadores, tales como separadores o ciclones que permitan separar las partículas del gas. El ahorro estimado de estas mejoras puede reducir el consumo eléctrico en 17.4 a 22 kWh/t y el consumo térmico en 0.21 a 0.22 GJ. Cabe mencionar que el principal ahorro se da con la recuperación del calor generado por el casco del horno, que normalmente se pierde al

ambiente, esto mediante monitoreo constante con equipos termográficos, Esta implementación permite ahorrar hasta el 18% del consumo térmico del horno. En la Figura 19 se observa el ahorro energético gracias a las mejoras aplicadas al proceso de clinkerización (Sahoo et al., 2022).

Figura 19

Ahorro energético en el proceso de clinkerización



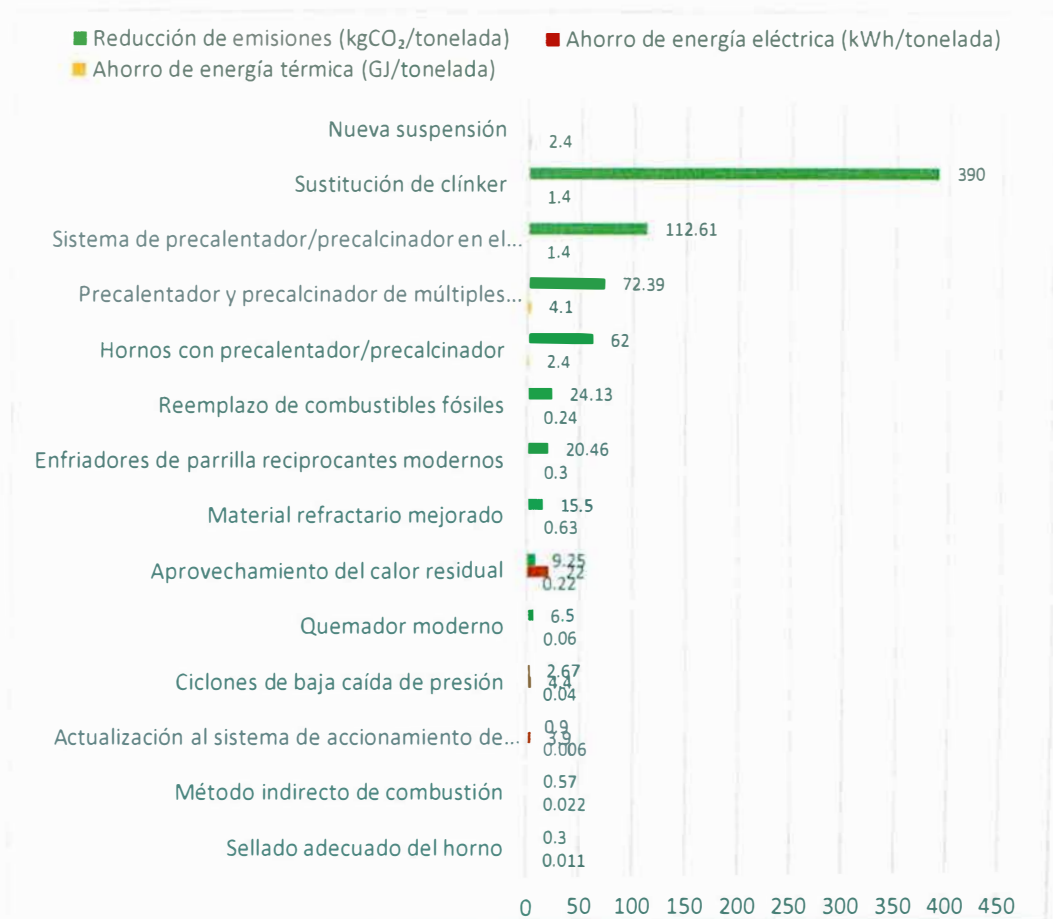
Nota: Tomado de "Review on energy conservation and emission reduction approaches for cement industry. *Environmental Development*" (p. 9), por Sahoo, N., Kumar, A., & Samsher, 2022^a, 44, 100767.

Proceso de molienda de cemento. La molienda de cemento consume alrededor del 60 a 70% del consumo eléctrico total de la planta, implementar acciones para minimizar este consumo es esencial para reducir los costos operativos y ser más rentables. A continuación, se presenta algunas estrategias actuales para reducir el consumo de energía en la molienda.

ambiente, esto mediante monitoreo constante con equipos termográficos, Esta implementación permite ahorrar hasta el 18% del consumo térmico del horno. En la Figura 19 se observa el ahorro energético gracias a las mejoras aplicadas al proceso de clinkerización (Sahoo et al., 2022).

Figura 19

Ahorro energético en el proceso de clinkerización



Nota: Tomado de "Review on energy conservation and emission reduction approaches for cement industry. *Environmental Development*" (p. 9), por Sahoo, N., Kumar, A., & Samsher, 2022^a, 44, 100767.

Proceso de molienda de cemento. La molienda de cemento consume alrededor del 60 a 70% del consumo eléctrico total de la planta, implementar acciones para minimizar este consumo es esencial para reducir los costos operativos y ser más rentables. A continuación, se presenta algunas estrategias actuales para reducir el consumo de energía en la molienda.

Cambio de tecnología en el proceso de molienda. El proceso de molienda convencional de cemento se lleva a cabo en molino de bolas horizontales, los cuales se encargan de secar y moler las materias primas, para luego pasar a un clasificador que separa las partículas gruesas de las finas y finalmente entrega el producto final. Actualmente, se tiene la tecnología del molino vertical, el cual permite secar, moler y clasificar las materias primas en un mismo equipo, disminuyendo los costos de mantenimiento hasta en 15%. La tecnología de los molinos verticales de alta presión permite ahorrar hasta en 0.2 a 0.29 GJ/t de consumo térmico y 10 a 25.95 kWh/t el consumo eléctrico específico.

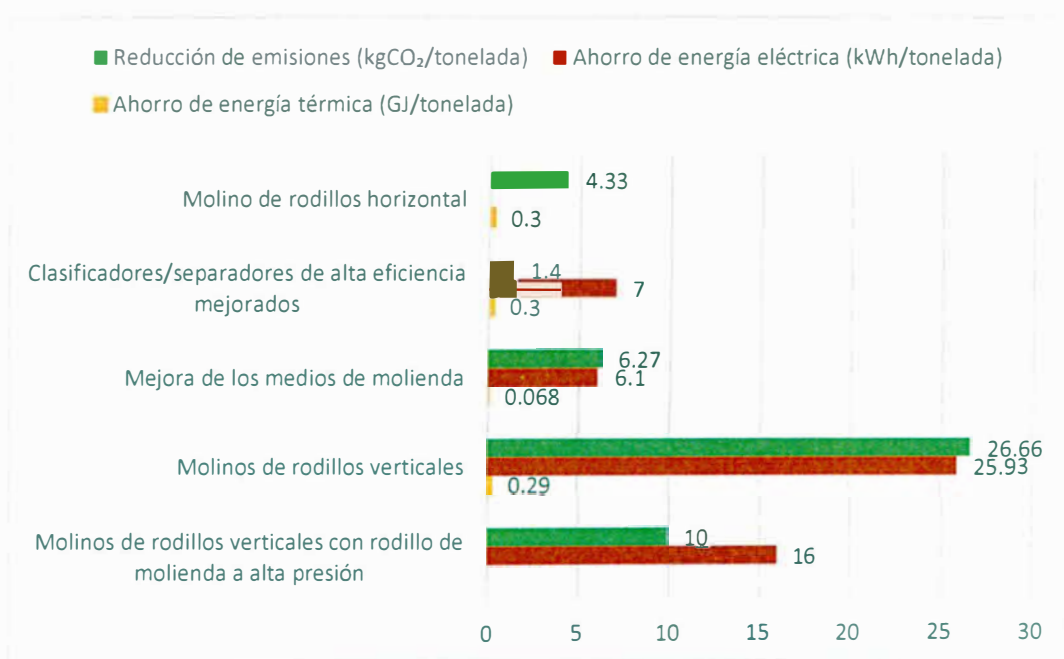
Mejora de los medios de molienda y la carga circulante. En un circuito de molienda se puede reducir el consumo de energía, mediante la selección adecuada de los medios de molienda. El tipo de bola que se va a cargar depende de la dureza del material a moler, diseño del molino y condiciones operativas. Otro factor importante es el nivel óptimo de grado de llenado que varía entre 23 a 28% por cámara, influyendo directamente en el consumo de energía. Estas medidas pueden ahorrar alrededor de 1.8 a 6.1 kWh/t de consumo eléctrico. La molienda en seco con agitación es una mejora que puede permitir disminuir el consumo térmico en hasta 18%. Actualmente se tiene clasificadores de alto rendimiento de cuarta generación, estos pueden permitir producir un cemento de mejor calidad y reducir el consumo de energía en 1.9 a 7 kWh/t (Sahoo et al., 2022).

Uso de aditivo mejorador de calidad de alto desempeño. Los aditivos que se incorporan a la molienda de cemento están hecho a base de aminos y se utilizan para evitar la aglomeración de partículas, en consecuencia, mejorar el rendimiento y las propiedades mecánicas del cemento. El uso de estos aditivos puede disminuir el consumo energético entre un 7% a 9% y aumentar el rendimiento hasta en un 32%. En la industria existen otras opciones a base de polycarboxilato, cuyo desempeño es mayor dependiendo del tipo de cemento y tecnología del proceso La escora de alto horno también pueden ser una alternativa para reemplazar al clinker, además que es más amigable con el medio

ambiente, generando menores emisiones de CO₂. Según investigaciones recientes los superplastificantes a base éter de policarboxilato se puede utilizar como un ayudante de molienda y fluidificador, mejorando el desempeño del proceso y mejorando las propiedades mecánicas del cemento. En la Figura 20 se observa el ahorro de energía con la implementación de mejoras aplicadas al proceso de molienda de cemento.

Figura 20

Ahorro energético en el proceso de molienda de cemento



Nota: Tomado de "Review on energy conservation and emission reduction approaches for cement industry. *Environmental Development*" (p. 10), por Sahoo, N., Kumar, A., & Samsher, 2022^a, 44, 100767.

Sin duda, la gestión energética en la industria cementera juega un papel esencial en la transición hacia una producción más sostenible, por ello la modernización de equipos, la optimización de motores y sistemas de iluminación forman parte de las soluciones adoptadas para reducir el consumo de energía y minimizar las emisiones. En particular, la recuperación de calor residual se perfila como una alternativa efectiva para optimizar el rendimiento térmico en procesos como la calcinación y la clinkerización (Doh & Wen, 2021).

Para optimizar la eficiencia térmica en la industria del cemento y reducir el consumo energético, se implementan diversas estrategias. La optimización del horno incluye el uso

de materiales refractarios avanzados, pre-calcinadores y un mantenimiento regular para minimizar pérdidas de calor. Los sistemas de recuperación de calor residual (WHRS) aprovechan el calor del enfriador de Clinker y los gases del pre-calentador para calentar las materias primas o generar electricidad. La sustitución de combustibles fósiles por alternativas como biomasa o residuos industriales, junto con el uso de subproductos como cenizas volantes y escorias, reduce la demanda térmica en la producción de Clinker (Ahmed et al., 2024).

La automatización mediante sistemas de control avanzado y análisis de datos permite ajustar parámetros en tiempo real para mejorar la eficiencia. Además, el aislamiento de superficies y el sellado adecuado del horno y el precalentador disminuyen pérdidas de calor. La ejecución del SGE bajo la norma ISO 50001 y auditorías periódicas ayudan a monitorear y mejorar la eficiencia. Finalmente, el uso de métricas como el balance térmico y el consumo energético específico (SEC) permite identificar oportunidades de optimización (Ahmed et al., 2024).

de materiales refractarios avanzados, pre-calcinadores y un mantenimiento regular para minimizar pérdidas de calor. Los sistemas de recuperación de calor residual (WHRS) aprovechan el calor del enfriador de Clinker y los gases del pre-calentador para calentar las materias primas o generar electricidad. La sustitución de combustibles fósiles por alternativas como biomasa o residuos industriales, junto con el uso de subproductos como cenizas volantes y escorias, reduce la demanda térmica en la producción de Clinker (Ahmed et al., 2024).

La automatización mediante sistemas de control avanzado y análisis de datos permite ajustar parámetros en tiempo real para mejorar la eficiencia. Además, el aislamiento de superficies y el sellado adecuado del horno y el precalentador disminuyen pérdidas de calor. La ejecución del SGE bajo la norma ISO 50001 y auditorías periódicas ayudan a monitorear y mejorar la eficiencia. Finalmente, el uso de métricas como el balance térmico y el consumo energético específico (SEC) permite identificar oportunidades de optimización (Ahmed et al., 2024).

Capítulo III. Desarrollo del trabajo

3.1. Metodología de la investigación

El presente estudio es de tipo aplicado, ya que se van a ejecutar principios de eficiencia energética para optimizar el consumo energético en el proceso de fabricación del Clinker, mediante la adopción del SGE. Por el enfoque será cuantitativo, siguiendo la metodología de Fernández y Baptista (2014) que implica etapas secuenciales desde la formulación del problema hasta la recolección de datos y evaluación de resultados. Esto debido a que se van a tomar datos operativos de la planta tales como potencia y flujos de alimentación, para determinar los indicadores energéticos tanto eléctricos como térmicos, evaluando el impacto energético y económico de las iniciativas de ahorro implementadas.

Por el alcance del estudio es una investigación descriptiva, ya que se va a detallar de forma descriptiva los consumos energéticos en las diferentes secciones de planta, con los cuales se van a identificar las áreas con mayor consumo de planta, mediante el análisis estadístico.

Por el diseño será no experimental ex post-facto, enfocándose en un análisis retrospectivo de las variables energéticas ya reportadas en los partes de producción del molino de cemento y horno de clinker. Esto con el objetivo de encontrar la influencia de las variables operativas en el consumo energético, identificando oportunidades de mejoras que permitan optimizar el consumo, sin necesidad de manipular las variables.

Finalmente, por el método de investigación, es deductivo, en razón en que se parte de la base conceptual del SGE, específicamente la norma ISO 50001 y de los métodos de optimización energética. El objetivo es hacer inferencias deductivas para una planta cementera, optimizando el consumo energético (Fernández y Baptista, 2014).

3.1.1. Variables y operacionalización

En la Tabla 6, se observa el cuadro resumen de operacionalización de las variables analizadas en el presente estudio, específicamente el consumo específico eléctrico y consumo específico térmico en las secciones de cemento y clinkerización, respectivamente. Estas variables son importantes debido a que representan los indicadores energéticos principales en una planta de cemento, permitiendo una evaluación de la eficiencia energética del proceso y un comparativo con otras plantas de cemento.

Tabla 6

Operacionalización de las variables

Variables	Dimensión	Indicadores	Unidad de medición
V1: Gestión de la energía	Estrategias operativas	Grado de mejora en la eficiencia de los procesos operativos	% optimización
V2: Optimizar el consumo de energético en una planta cementera	Eficiencia energética	Consumo específico térmico del horno de clinker	kcal/kg clinker
		Consumo específico eléctrico del molino de cemento	kWh/ t cemento

3.1.2. Población y muestra

Población. Plantas de cemento del Perú.

Muestra. Horno de clinker y el molino de cemento en una planta cementera ubicada en la región Selva.

Recopilación de datos. La información será extraída de los presupuestos anuales y los reportes diarios y mensuales de operación, validados por el área de producción, así mismo la data de calidad será extraída del sistema LIMS, plataforma principal del área de calidad

Técnica de procesamiento de datos. El tratamiento de la data operativa y de calidad será llevado a cabo con el software estadístico de Microsoft Excel, mediante estadística descriptiva.

Validez y confiabilidad de los datos. La data mostrada en este trabajo tanto de consumo de carbón, flujos de balanzas y datos de calidad de finura ha sido obtenida de equipos debidamente calibrados.

3.2. Desarrollo del trabajo

3.2.1. Diagnóstico energético

El diagnóstico energético es un análisis detallado del consumo de energía en un proceso o instalación. Esta evaluación consiste en recopilar información e identificar de manera clara como se está consumiendo la energía y además cuáles son los principales equipos consumidores. El objetivo es implementar acciones que permitan reducir el consumo energético y cuantificar las potenciales oportunidades de ahorro.(Calla y Maldonado, 2023).

Para que se lleve a cabo este trabajo, se requiere tener establecidos los indicadores energéticos ya calculados en la planta. A continuación, se muestra los tipos de diagnósticos energéticos, lo cuáles pueden ser de 1er nivel, 2do nivel o 3er nivel, tal como se muestra en la Figura 21 (GIZ, 2025).

Figura 21

Tipos de diagnósticos energéticos

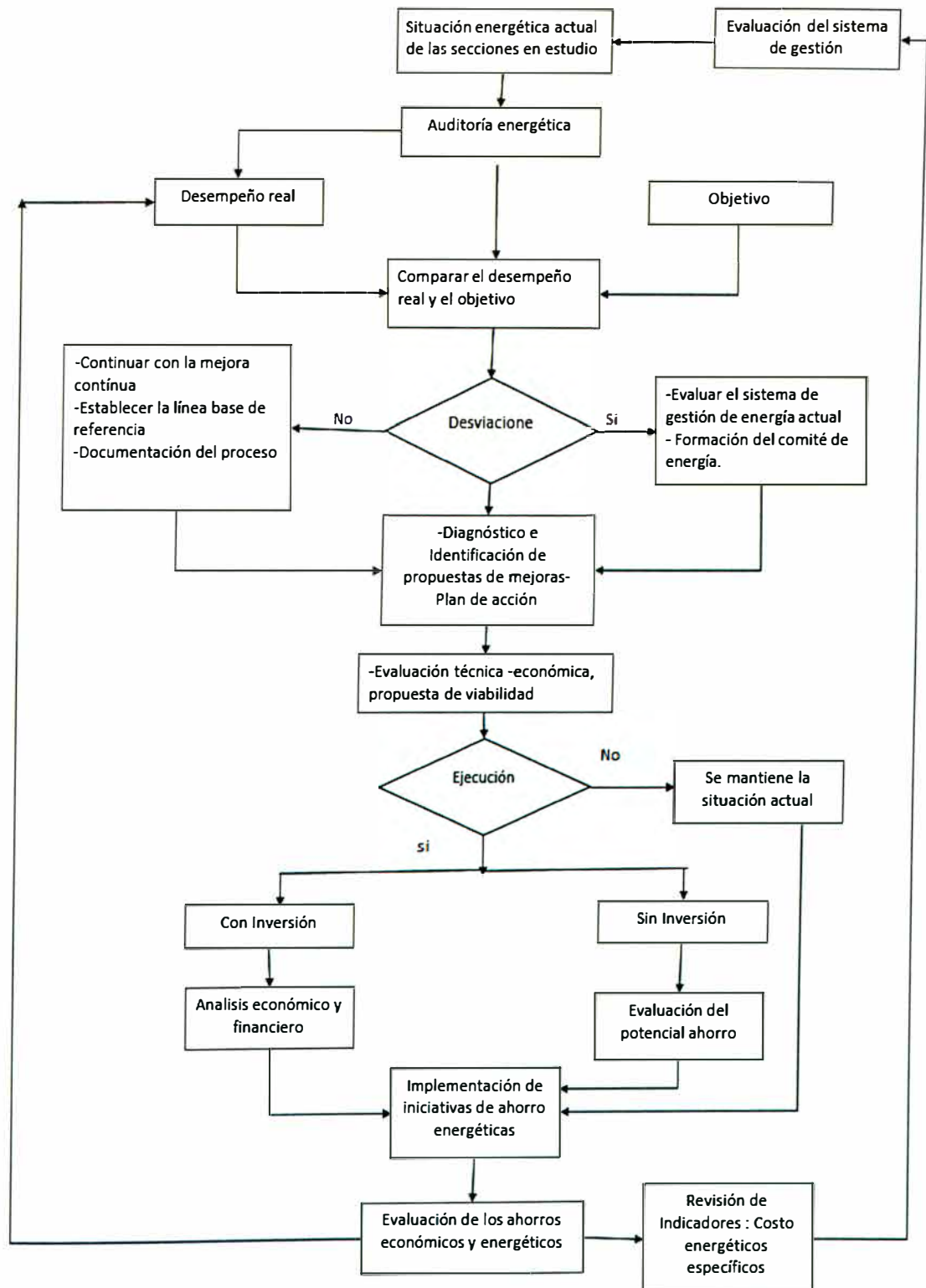


Nota: Adaptado de Red de aprendizaje en Sistemas de Gestión de Energía, GIZ-Cooperación Técnica Alemana, 2025.

El diagnóstico energético se va a realizar tomando como referencia el segundo nivel, dado que recién se están estableciendo las bases para la adaptación y ejecución del SGE a la sección de hornos y molinos. Conforme va madurando el sistema de gestión se va a ir realizando un plan más detallado que abarque un análisis extensivo y específico para cada proceso. La Metodología será basado en el ciclo de la mejora continua, la cual pone énfasis en optimizar el rendimiento energético. En la Figura 22 se observa el diagrama de flujo que muestra la evaluación y tratamiento del diagnóstico energético.

Figura 22

Metodología del diagnóstico energético



Nota: Adaptado de "El ahorro de energía en la industria cementera como estrategia de la excelencia operativa" (p. 40), por Gilvonio, L, 2005, [Tesis de Maestría], UNMSM.

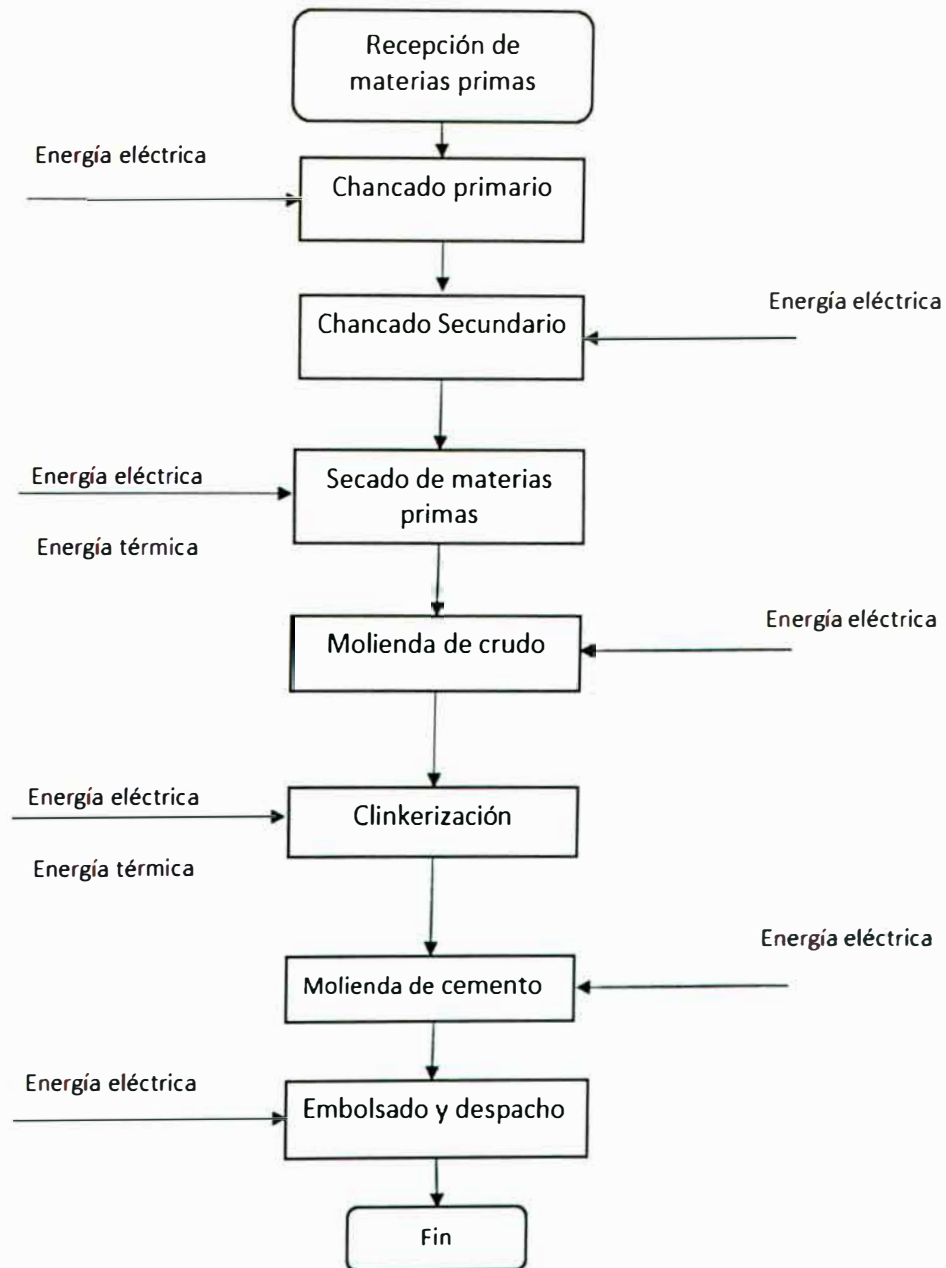
Como se observa en la Figura 22, como primer paso se realizará la evaluación energética de las secciones en estudio tanto del horno de clinker como el molino de cemento, recopilando datos y mediciones, para luego comparar con los objetivos energéticos propuestos, todo esto para proponer e implementar un plan de acción que permitan reducir los costos energéticos y cumplir con los objetivos. Una vez establecidos las iniciativas de ahorro se va a evaluar su viabilidad, mediante análisis de costo beneficio. Finalmente, se evaluarán los resultados obtenidos y se revisarán los indicadores tras la implementación del SGE y compararlo con la situación previa a la implementación. El enfoque de este trabajo será realizado en a aquellas iniciativas que no requieran inversión, dado que el SGE da énfasis en las buenas prácticas y la excelencia operativas. Según la experiencia, el potencial ahorro del sistema energético puede llegar a alcanzar el 40% de los costos energéticos.

3.2.2. *Diagnóstico energético actual*

Actualmente se tienen medidores de energía en todas las secciones del proceso, lo cuales permiten establecer indicadores comparativos y calcular los consumos específicos. En la figura 23 se muestra el diagrama de flujo del proceso y el tipo de energía consumida en cada fase del proceso de fabricación del cemento. El tipo de energía consumida es de tipo eléctrica y térmica, proveniente principalmente del carbón (Pelser et al., 2018b).

Figura 23

Proceso de producción de cemento y consumos de energía



A continuación, se detalla un resumen breve de cada proceso:

El chancado primario consiste en reducir el tamaño de la partícula de caliza, de 10 pulgadas a 4 pulgadas, mediante una chancadora de quijada con una capacidad de 100 t/h. Para luego ser almacenado en un silo de 800 t de capacidad, los principales equipos eléctricos son el motor de la chancadora y el accionamiento de las fajas.

El chancado secundario consiste en reducir el tamaño de la partícula de caliza, de 4 pulgadas a 0.5 pulgadas, mediante una chancadora de quijada con una capacidad de 100 t/h. Para luego ser almacenado en un silo de 800 t de capacidad, los principales equipos eléctricos son el motor de la chancadora y el accionamiento de las fajas.

El secado de materias primas se realiza en un secador rotatorio de 120 t/h de capacidad para la caliza y 50 t/h para la arcilla, en el caso de la caliza se requiere disminuir la humedad de 3% a 1% y de la arcilla de 25% a < 6%. El combustible utilizado es la cascarilla de arroz, el cual reacciona con el aire inyectado mediante un soplador. El producto obtenido y secado se almacena en silos de 350 t de capacidad. Los principales equipos eléctricos utilizados son el motor del secador rotatorio, el motor del soplador y el accionamiento de las fajas transportadores.

La molienda de crudo consiste en moler todas las materias primas previamente trituradas y secadas y se realiza en un molino de bolas de 70 t/h de capacidad y cuyo producto cumple con las especificaciones requeridas de finura. El producto final se almacena en silos de 320 t de capacidad. Los principales equipos eléctricos son el motor principal, auxiliar, reductor, motor del aspirador principal, motor del separador y el accionamiento de las fajas transportadoras.

El proceso de clinkerización está compuesto principalmente por un horno con una capacidad de 240 t/d, y se encarga de producir clinker, en su interior las temperaturas llegan hasta 1,450 °C, temperatura necesaria para el proceso de conversión. El sistema consume energía eléctrica y térmica, la energía térmica lo suministra la combustión del carbón, cuyo poder calorífico varía alrededor de 6,000 kcal/kg. El carbón previamente ha pasado por un proceso de chancado para obtener la finura óptima. Los principales consumidores de energía eléctrica son el motor encargado de girar la estructura, el motor del aspirador principal, el motor del ventilador que suministra el aire para la combustión y el accionamiento de los transportadores.

La molienda de cemento consiste en moler el clinker y las adiciones previamente trituradas y secadas, todo este proceso se realiza en un molino de bolas de 30 ton/h de capacidad, cuyo producto cumple con las especificaciones de finura requerido por la norma técnica peruana. El producto final se almacena en silos de 350 t de capacidad, desde donde se despacha a granel o en bolsas de 42.5 kg. Los principales equipos eléctricos son el motor principal, auxiliar, reductor, motor del aspirador principal, motor del separador y el accionamiento de las fajas transportadoras.

Como se observa en la Figura 23, el diagnóstico energético se realizará en la sección de hornos y molino de cemento, específicamente en el horno de clinker y molino de cemento. En base a las mediciones se va a calcular los indicadores energéticos, en el caso de la sección de clinkerización se va a calcular los consumos térmicos específicos y en el caso de la sección de molino de cemento, se va a calcular los consumos eléctricos específicos.

3.2.3. Consumo de energía

En la Tabla 7 se muestra los consumos específicos del 2023 tanto de energía eléctrica para el molino de cemento y energía térmica para el horno de clinker, también se especifica los consumos eléctricos y las producciones mensuales de cada equipo. Respecto a los datos de producción son obtenidos de los reportes de puestos de trabajo y los consumos eléctricos de los medidores de planta. El consumo térmico proviene principalmente del carbón, combustible principal y de mayor uso para la fabricación del cemento, el suministro de energía eléctrica es entregada por la empresa generadora.

Tabla 7*Consumo térmico y eléctrico en el horno y molino de cemento (2023)*

Año 2023	Producción horno (t)	Producción cemento (t)	Consumo eléctrico - Cemento (kWh)	Consumo térmico-Horno (kcal)	Consumo eléctrico específico del cemento (kWh/t cmt)	Consumo térmico específico del horno (kcal/kg clinker)
Enero	7,182.8	17,691.1	897,738.7	8,461,377,274	50.75	1,178
Febrero	6,273.7	18,134.1	907,625.6	7,333,961,145	50.05	1,169
Marzo	6,894.2	18,451.8	919,066.4	7,624,996,260	49.81	1,106
Abril	6,765.5	15,879.7	832,191.1	7,604,370,296	52.41	1,124
Mayo	7,283.8	17,691.8	905,656.8	8,332,624,872	51.19	1,144
Junio	7,101.6	17,834.9	884,559.6	8,145,579,933	49.60	1,147
Julio	7,181.9	18,724.0	973,257.8	8,180,204,602	51.98	1,139
Agosto	7,470.9	17,193.3	899,086.2	8,696,108,976	52.29	1,164
Setiembre	7,155.4	17,529.7	937,580.9	8,357,511,872	53.49	,1,168
Octubre	3,526.2	8,777.9	463,674.6	4,157,436,960	52.82	1,179
Noviembre	4,702.2	9,963.6	534,885.1	5,308,761,220	53.68	1,129
Diciembre	7,075.2	17,630.3	786,967.7	7,888,862,495	44.64	1,115
Promedio	6,551	16,291.9	828,524.2	7,507,649,659	51.06	1,147

3.2.4. Consumo térmico específico en el horno de clinker

El consumo de energía térmica en el horno es proveniente principalmente del carbón, el cual reacciona con el aire a presión proveniente de un ventilador, el calor generado producto de la combustión, se transfiere a la harina crudo, mediante el mecanismo de conducción y convección. Este proceso permite que el material alcance temperaturas cercanas a 1,450 °C, Finalmente el clinker pasa por un sistema de enfriamiento brusco que permite consolidar las propiedades mecánicas del material. En la Figura 24 se muestra el consumo térmico del proceso de clinkerización, donde la energía es proveniente principalmente de la combustión del carbón.

Figura 24

Flujos de entrada y salida de energía en el proceso de clinkerización



Como se observa en la Figura 24, el ingreso de energía al sistema proviene de la combustión del carbón, del calor sensible del aire, carbón y harina de crudo. Para calcular la energía suministrada por el carbón, se va a considerar la cantidad de carbón ingresado al sistema y la medición del poder calorífico realizado en el área de calidad, mediante un equipo LECO debidamente certificado y calibrado, En la Tabla 8 se puede observar el cálculo del consumo térmico específico tomado como base la producción de clinker. Para el caso del calor sensible tanto del carbón y de la harina cruda, se está tomando como referencia los coeficientes específicos de bibliografía (Castillo, 2024).

Tabla 8*Consumo térmico específico en el horno-2023*

Ingreso de carbón	1.97	t/h
Alimentación de Harina Cruda	18	t/h
Factor Crudo/Clinker	1.725	
Producción de Clinker	10.43	t/h
Poder Calorífico	6,067	kcal/kg carbón
Combustión del carbón	1,147.0	kcal/kg clinker
Alimentación de Harina Cruda	18	t/h
Factor Crudo/Clinker	1.725	
Producción de Clinker	10.43	t/h
Temperatura Harina Cruda	60.00	°C
Calor sensible Harina cruda	0.2142	kcal/kg °C
Calor sensible Harina cruda	12.9	kcal/kg clinker
Alimentación de Carbón	1.97	t/h
Factor Crudo/Clinker	1.725	
Producción de Clinker	10.43	t/h
Temperatura Carbón	60.00	°C
Calor sensible Carbón	0.4358	Kcal/Kg °C
Calor sensible del carbón	2.9	kcal/kg clinker
Flujo de aire	18.30	t/h
Factor Crudo/Clinker	1.725	
Producción de Clinker	10.43	t/h
Temperatura aire	28.00	°C
Calor sensible aire	0.248232	kcal/kg °C
Calor sensible del aire de enriamiento	1.3	kcal/kg clinker
Energía total suministrada	1164.1	kcal/kg clinker

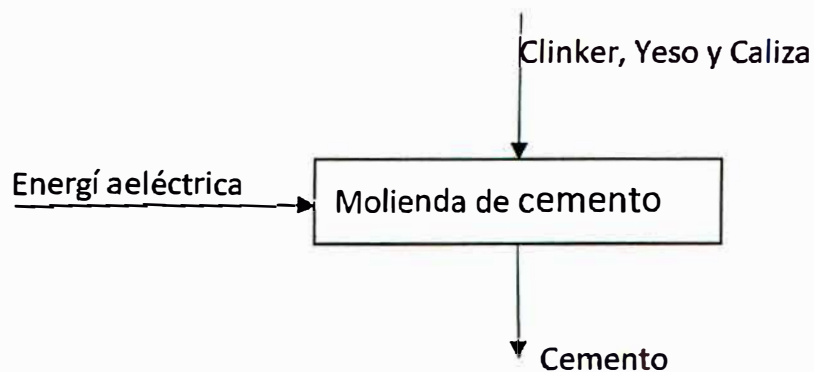
Como se observa en la Tabla 8, se ha hecho un cálculo de los ingresos de energía al sistema como diagnóstico energético inicial, sin embargo, se tomará como indicador solo la energía térmica suministrada por el combustible, dado que, para seguimiento, es el valor que se tiene calculado en línea y va a permitir evaluar el desempeño térmico del proceso luego de la implementación de las estrategias de mejora.

3.2.5. Consumo eléctrico específico en el molino de cemento

El consumo de energía eléctrica en el molino de cemento es proveniente principalmente del motor principal del molino que representa alrededor del 70% del total, cuya función principal es reducir el tamaño de las materias primas y lograr la finura requerida por el proceso. En la Figura 25 se muestra el consumo eléctrico del proceso de molienda de cemento.

Figura 25

Flujos de entrada de energía en el proceso de molienda



Como se observa en la Figura 25, el 100% de ingreso de energía es eléctrica, por lo que todas las medidas que contribuyan al ahorro energético se enfocarán en este consumo. En la Tabla 9 se observa la distribución del consumo eléctrico en el proceso de molienda, como se observa el mayor consumo está distribuido entre el motor del molino de cemento, el ventilador principal y el motor del separador, representando el 89% del consumo total de energía. El 11 % restante proviene del consumo de equipos auxiliares, que no se analizarán en este trabajo, por requerir inversión inicial para mejorar la eficiencia.

Tabla 9*Distribución del consumo eléctrico en el molino de cemento – 2023*

Año 2023	Horas de Operación(h)	Consumo eléctrico (kWh)	Participación
Ventilador del filtro de balanzas	7,509	48.3	3%
Motor de las fajas transportadoras	7,509	25.7	2%
Motor principal del molino	7,509	1187.8	76%
Bombas de lubricación	7,509	42.6	3%
Motor del separador	7,509	44.8	3%
Ventilador principal del filtro	7,509	150.0	10%
Equipos auxiliares	7,509	61.0	4%
Total de consumo		1560.2	100%

Tal como se observa en la Tabla 9, se han calculado los consumos eléctricos de los equipos principales de la sección de molinos. En el caso de los equipos eléctricos auxiliares al no tener el cálculo directo de la potencia en el sistema, se ha estimado con los valores medidos de amperaje, considerando un motor trifásico y un factor de potencia de 0.9.

3.3. Indicadores de consumo de energía

Para establecer el desempeño del proceso se van a considerar dos indicadores, consumo térmico específico para el horno y consumo eléctrico específico para el molino de cemento.

3.3.1. Consumo térmico específico

El consumo térmico específico se expresa como la cantidad de energía que suministra el combustible en kcal, en este caso el carbón, con respecto a la cantidad de clinker producido. Se expresa en kcal/kg clinker.

3.3.2. Consumo eléctrico específico

El consumo eléctrico específico se expresa como la cantidad de energía eléctrica suministrada al sistema de molienda en kWh, con respecto a la cantidad de cemento producido. Se expresa en kWh/ t de cemento.

3.4. Diseño de estrategias operativas

El diseño de estrategias se enfocó en las secciones de la planta de cemento que consumen más energía, especialmente el horno de clinker y molino de cemento. Estas estrategias están enfocadas en aquellas iniciativas de ahorro que no requieren inversión inicial y se alinean con lo establecido por la norma ISO 50001. Estas estrategias se enfocaron en acciones que permitan optimizar la operación sin afectar la calidad del producto. Entre ellas se cuenta con la optimización de los parámetros de operación y el seguimiento de los consumos energéticos. En la Tabla 10 se muestra las estrategias definidas para cada sección, con énfasis en la optimización de las variables operativas, así como el seguimiento y control.

Tabla 10

Estrategias operativas en el horno de clinker y molino de cemento

Estrategia Operativa	Aplicación en el horno de clinker	Aplicación en el molino de cemento
Optimización de las variables operativas	Optimizar la finura de la alimentación	Mejorar la productividad mediante el uso de aditivo de alto rendimiento
	Establecer lineamientos de operación	Optimizar la granulometría de las materias primas al ingreso del molino
	Uso de carbón molido de alto poder calorífico como corrector	
Control y monitoreo	Monitoreo en tiempo real de las temperaturas, presiones y calidad de las materias primas	Monitoreo en tiempo real de los amperajes, presiones y calidad de las materias primas
	Seguimiento diario al reporte de consumo térmico y productividad	Seguimiento diario al reporte de consumo eléctrico y productividad

3.5. Estrategias operativas para reducir el consumo térmico y eléctrico

Como parte del sistema de gestión energética, se propusieron algunas iniciativas de ahorro energético alineados a los objetivos estratégicos de la empresa. Estas estrategias se desarrollaron en las secciones de hornos y molino de cemento.

3.5.1. Horno de clinker

Optimización de la finura de la harina de alimentación al horno. La finura óptima de la harina cruda juega un papel importante en el consumo térmico del horno, debido a que, al reducir la finura del material aumenta el contacto superficial, reaccionando más rápido con el oxígeno y optimizando la combustión. Se encontró mediante pruebas que el rango óptimo de trabajo es de 12 a 13% de retenido en la malla 170 (90 μm), respecto a años anteriores que se mantenía en el rango de 14 a 15%. Estos resultados se encontraron en coordinación con el área de calidad, ajustando la finura en el molino de crudo y relacionando con el consumo térmico del horno.

Establecer los lineamientos de operación para mejorar la estabilidad del proceso. Para optimizar un proceso primero es necesario estabilizar el mismo y mantener las condiciones operativas dentro de los rangos de control establecidos. La bibliografía indica que implementando un sistema de control avanzado en automático puede permitir ahorrar entre 5 a 20% del consumo térmico, sin embargo, este estudio está enfocado a implementar medidas que no requieran inversión inicial, sino solo mejorando las prácticas operativas. La operación del horno se lleva a cabo las 24 horas del día, los 365 días del año. Establecer lineamientos claros y documentados que permitan unificar el criterio de operación y mejorar la coordinación entre operadores es clave si se requiere reducir el consumo térmico. En la Tabla 11, se presenta un cuadro donde se muestran los lineamientos implementados para mejorar la estabilidad del proceso, dando énfasis en la importancia de unificar criterios operativos y sobreactuar innecesariamente.

Tabla 11

Lineamientos operativos de estabilidad en el horno de clinker

Variable manipulada	Variable controlada	Acción	Responsable
VARIABLES OPERATIVAS DEL HORNO: Flujo de alimentación, flujo de aire, ratio de combustible y apertura del aspirador principal.	<ul style="list-style-type: none"> *Temperatura del horno *Cal libre del clinker *C₃S del clinker *Pérdida al fuego del clinker *T entrada al filtro *Condición física de la llama 	30 min antes del cambio de turno, no se deben modificar las variables operativas, salvo alguna condición que requiere hacerlo, siempre y cuando él no hacerlo pueda afectar la estabilidad del proceso o seguridad del operador de campo.	Operador de sala de control/jefe de guardia
VARIABLES OPERATIVAS DEL HORNO: Flujo de alimentación, flujo de aire, ratio de combustible y apertura del aspirador principal.	<ul style="list-style-type: none"> *Temperatura del horno *Cal libre del clinker * C₃S del clinker *Pérdida al fuego del clinker *T entrada al filtro *Condición física de la llama 	En caso se requiera manipular alguna variable, solo se debe ajustar hasta un +-3% en un solo paso y esperar que la variable entre en rango de control, este ajuste se repite en caso la variable a controlar siga fuera de rango de control, salvo algún evento que requiera un ajuste brusco > +/- 3%, previa coordinación con el jefe de guardia.	Operador de sala de control/jefe de guardia
VARIABLES OPERATIVAS DEL HORNO: Flujo de alimentación, flujo de aire, ratio de combustible y apertura del aspirador principal.	<ul style="list-style-type: none"> *Temperatura del horno *Cal libre del clinker * C₃S del clinker *Pérdida al fuego del clinker *T entrada al filtro *Condición física de la llama 	Si a pesar de realiza el ajuste tal como lo establecido, la variable controlada sigue fuera de rango de control por más de 2 horas consecutivas, se debe avisar al jefe de producción/jefe de calidad para tomar las acciones correspondientes y evaluar el tratamiento	Operador de sala de control/Analista de control de calidad/jefe de guardia/jefe de calidad/jefe de producción

VARIABLES OPERATIVAS DEL HORNO

VARIABLES CONTROLADAS DEL HORNO

Si bien se tiene establecido el criterio de ajuste en función a los resultados obtenidos tanto operativos como de calidad, el evitar movimientos innecesarios para sobreactuar es esencial para lograr la estabilidad del proceso. Por lo que, si variable se encuentra dentro de los parámetros de control, los movimientos deben ser mínimos o no se debe tocar nada, salvo algún escenario que requiera hacerlo, previa evaluación con el jefe de guardia.

Operador de sala de control/Analista de control de calidad/jefe de guardia

Uso de carbón molido en el proceso de clinkerización. Actualmente en planta hay cuatro hornos, de los cuales dos hornos cuentan con una tecnología antigua, requiriendo que el flujo de combustible sea mayor que los hornos de mayor eficiencia. Por lo que optimizar el uso del carbón en estos hornos antiguos, permitiría disminuir el consumo de carbón en el horno de clinker e estudio, principal horno de la planta y que cuenta con la mayor capacidad. Adicional a que no se cuenta con un molino de carbón independiente. Por lo que se usa carbón con finura de 25% en malla 230 con abertura de 63 μm , producido por un molino de crudo, el cuál muele el carbón, caliza, arcilla y hierro al mismo tiempo. Se debe tener en cuenta que la finura del combustible influye directamente en la eficiencia de la combustión.

La propuesta de mejora desarrollada incluyó traer 14 t mensuales de carbón molido de otra planta, cumpliendo las especificaciones requeridas de retenido < 8% en malla de abertura de 63 μm y poder calorífico > 6,200 kcal/kg. Este carbón se agregó por una línea auxiliar del horno 2, previamente acondicionada en una proporción de 65 kg/h, permitiendo disminuir la ratio de carbón global en el crudo en 0.2%. Esta dosificación se realizó evaluando diferentes escenarios tanto en la parte operativa como la parte química del combustible y harina crudo. En la Tabla 12 se muestra la cantidad de carbón adicional que se dosificará al horno con menor eficiencia según la calidad del combustible para reducirlo. El flujo requerido va a depender de la energía requerida para la clinkerización y se toma como referencia el poder calorífico de 6,000 kcal/kg, energía necesaria para la clinkerización.

Tabla 12

Dosificación adicional de carbón molido en función de la calidad

Poder calorífico del carbón (kcal/kg)	Cenizas carbón (%)	Flujo de carbón (t/h)	Flujo de carbón adicional (kg/h)
6000	<17%	1.65	0.00
5900	<18%	1.68	29.14
5800	<18-19%>	1.71	59.28
5700	<19-20%>	1.74	90.48
5600	>20%	1.77	122.79
5500	>20%	1.80	156.28
5400	>20%	1.84	191.00

Seguimiento y monitoreo diario al consumo de energía térmica. Como parte del seguimiento y control de los indicadores energéticos se implementó reportes diarios, donde se muestran la producción y el consumo específico térmico del horno de clinker. Estos reportes se envían de forma diaria a los jefes de guardia, ingenieros de producción, jefe de producción y jefe de mantenimiento. Asimismo, en las gráficas están establecidos los límites permitidos de consumo.

3.5.2. Molino de cemento

Uso de aditivo de alto desempeño para aumentar el rendimiento del molino.

El aditivo ayudante de molienda es importante porque permite mejorar el rendimiento del molino, evitando la aglomeración de las partículas y haciendo que disminuya el retorno de material del separador al molino. Actualmente hay diferentes tipos de aditivos dependiendo de la necesidad del proceso, los más usados son los que permiten aumentar el rendimiento del molino. En las pruebas realizadas se encontró que el uso de aditivo CS2 de alto desempeño de la empresa Seis Marías, permitió aumentar el rendimiento del molino en 2 t/h o 7%, comparado con el uso de aditivo usado anteriormente de bajo desempeño. Las

pruebas se realizaron a diferentes concentraciones de aditivo y se realizaron en coordinación con el área de control de calidad.

Control de la granulometría de las materias primas. Como antecedente se tenía que el molino sufría muchas sobrecargas, teniendo que bajar carga para estabilizar, generando que aumente el consumo específico de energía. Esto debido a la granulometría del material por encima de lo requerido, generando sobre esfuerzo e inestabilidad en el proceso. Las materias primas principales utilizadas en la molienda de cemento son: clinker, caliza y yeso. El control de la granulometría de estos materiales es importante para reducir el consumo eléctrico del molino. En las pruebas realizadas se encontró que reducir el tamaño de las partículas de ingreso de 2 pulgadas a < 1 pulgada, reducía el consumo eléctrico específico en 2%, esto se logró sin inversión, solo ajustando de manera periódica la chancadora tanto de clinker y yeso. Estas pruebas se realizaron en coordinación con el operador de planta, mantenimiento y supervisión de planta.

Seguimiento y monitoreo diario al consumo de energía eléctrica. Como parte del seguimiento y control de los indicadores energéticos se implementó reportes diarios, donde se muestran la producción y el consumo eléctrico del molino de cemento. Estos reportes se envían de forma diaria a los jefes de guardia, ingenieros de producción, jefe de producción y jefe de mantenimiento. Asimismo, en las gráficas están establecidos los límites permitidos de consumo de energía. Adicional a estos reportes, se implementó una plataforma en tiempo real para hacer seguimiento a las variables que más influyen en el consumo de energía.

3.6. Diagnóstico energético luego de la implementación de las mejoras

La metodología propuesta es el punto de partida para la adopción de un sistema de energía que permita identificar, medir y proponer iniciativas de mejora en temas energéticos, esto con el objetivo de tener un proceso más eficiente con un impacto positivo al medio ambiente. La implementación del SGE inicia con la identificación de la situación

actual energética, la cual estuvieron involucradas todas las áreas. Es importante en este punto que la alta dirección esté alineada con los objetivos propuestos por el SGE. Una vez establecido la situación actual, se implementan indicadores energéticos, que servirán para monitoreo y control. En la Tabla 13 se observa los resultados obtenidos de consumo eléctrico específico en el molino de cemento y consumo térmico específico en el horno, después de la ejecución del SGE, principalmente ejecutando aquellas mejoras que no requieren inversión, pero tiene un alto impacto en el consumo energético.

Tabla 13

Consumos energéticos específicos después de la ejecución del SGE

Año 2024	Producción Horno (t)	Producción Cemento (t)	Consumo eléctrico - Cemento (kWh)	Consumo térmico- Horno (kcal)	Consumo eléctrico específico del cemento (kWh/t cmt)	Consumo térmico específico del horno (kcal/kg clinker)
Julio	6,634.8	19,719.0	978,120.87	7,636,643,290	49.60	1,151
Agosto	7,094.9	20,090.3	947,714.83	8,116,531,280	47.17	1,144
Setiembre	6,969.9	19,318.3	938,634.97	7,848,084,880	48.59	1,126
Octubre	7,310.0	20,897.6	989,514.69	8,245,691,280	47.35	1,128
Noviembre	5,329.8	17,929.3	860,384.72	5,937,430,620	47.99	1,114
Diciembre	6,299.0	19,664.7	933,793.71	7,092,719,040	47.49	1,126
Promedio	6,606.4	19,603.2	941,360.6	7,479,516,732	48.03	1,132

Con los datos mostrados en la Tabla 13, se puede determinar el porcentaje de optimización interanual luego de la implementación de las estrategias operativas enfocadas en la gestión de energía. Inicialmente se determinaron como línea base los consumos energéticos en el horno y molino de cemento mediante los datos del 2023. Después se ejecutaron estrategias de ahorro como optimizar el proceso y el seguimiento de los indicadores energéticos. Estas mejoras permitieron reducir el consumo energético

tal como se observa en la Tabla 14, el cual muestra el consumo antes y después de la implementación.

Tabla 14

Porcentaje de optimización en el horno y molino de cemento

Mes	Consumo eléctrico del molino (kWh/t)-2023	Consumo térmico del horno (kcal/kg clinker)-2023	Consumo eléctrico del molino (kWh/t)-2024	Consumo térmico del horno (kcal/kg clinker)-2024	% Optimización - Horno	% Optimización - Molino
Julio	51.98	1,139	49.60	1,151	-1.1%	4.8%
Agosto	52.29	1,164	47.17	1,144	1.7%	10.9%
Setiembre	53.49	1,168	48.59	1,126	3.6%	10.1%
Octubre	52.82	1,179	47.35	1,128	4.3%	11.6%
Noviembre	53.68	1,129	47.99	1,114	1.3%	11.9%
Diciembre	44.64	1,115	47.49	1,126	-1.0%	-6.0%
Promedio	51.48	1,149	48.03	1,132	1.5%	7.2%

3.7. Evaluación de los ahorros energéticos

Para determinar el ahorro económico debido al SGE implementado, se tomó como referencia base los indicadores del periodo 2023. Es necesario recalcar que el ahorro presentado en este trabajo es el resultado de las iniciativas de mejora que no han requerido inversión inicial, solo se han replicado las buenas prácticas operativas alineadas a la innovación y excelencia operativa.

3.7.1. Ahorro de energía térmica en el proceso de clinkerización

El ahorro térmico obtenido se va a calcular en base a las toneladas producidas en el periodo de estudio. En la Tabla 15 se observa la ratio de carbón utilizado por tonelada de clinker producido en el periodo de julio a diciembre del año 2023 y 2024, asimismo el ahorro del carbón utilizado en el proceso.

Tabla 15*Ahorro económico por las mejoras ejecutadas en el horno de clinker*

Mes/Año	Consumo específico 2023 (kcal/kg clinker)	Consumo específico 2024 (kcal/kg clinker)	Ratio carbón/clinker 2023(%)	Ratio carbón/Clinker 2024(%)	Ahorro de consumo de carbón (t)	Ahorro de consumo de carbón(S/.)
Julio	1,139	1151	18.98	18.18	53.33	S/ 25,867
Agosto	1,164	1,144	19.04	18.09	66.95	S/ 32,469
Setiembre	1,168	1,126	19.05	18.06	69.25	S/ 33,588
Octubre	1,179	1,128	19.01	18.29	52.58	S/ 25,503
Noviembre	1,129	1,114	18.93	18.27	35.21	S/ 17,078
Diciembre	1,115	1,126	18.76	18.19	35.75	S/ 17,338
Total	1,149	1,132			313.08	S/ 151,842

Como se observa en la Tabla 15, el ahorro económico desde julio a diciembre del 2024 por la ejecución de las mejoras operativas fue de S/ 151,842, que representa una disminución del consumo de carbón de 4.1% con respecto al mismo periodo del 2023.

3.7.2. Ahorro de energía eléctrica en el molino de cemento

El ahorro eléctrico obtenido se calculará según las toneladas producidas en el periodo de estudio. En la Tabla 16 se observa el consumo eléctrico por tonelada de cemento producido en el periodo de julio a diciembre del año 2023 y 2024, asimismo el ahorro obtenido por la disminución del consumo de energía eléctrica.

Tabla 16

Ahorro económico luego de las mejoras ejecutadas en el molino

Mes/Año	Consumo eléctrico específico del cemento-2023 (kWh/t Cmto)	Consumo eléctrico específico del cemento - 2024 (kWh/t Cmto)	Ahorro de consumo de energía (kWh)	Ahorro de consumo de energía (S/.)
Julio	51.98	49.60	46,858	S/ 10,309
Agosto	52.29	47.17	102,866	S/ 22,631
Setiembre	53.49	48.59	94,607	S/ 20,813
Octubre	52.82	47.35	114,352	S/ 25,158
Noviembre	53.68	47.99	102,129	S/ 22,468
Diciembre	44.64	47.49	-56,017	-S/ 12,324
Total	51.48	48.03	404,795	S/ 89,055

Como se observa en la Tabla 15, el ahorro económico desde julio a diciembre del 2024 por la ejecución de las mejoras operativas fue de S/ 89,055, que representa una disminución del consumo eléctrico de 6.1% con respecto al 2023.

Capítulo IV. Análisis y discusión de resultados

En este capítulo se presenta los resultados obtenidos por la implementación de la gestión de energía en el horno de clinker y molino de cemento, Para ello, se hizo una comparación del consumo de energía antes y después de la ejecución. Adicionalmente, se realizó el comparativo con los resultados obtenidos con otros trabajos similares. Con el objetivo de validar los hallazgos y situar los resultados en un contexto más amplio.

Según (MINEM, 2017) el consumo térmico en lo hornos rotatorios por vía semihúmeda varía entre 1,077 kcal/kg Clinker y 1,435 kcal/kg, dependiendo del porcentaje de humedad. El consumo térmico específico obtenido el año 2023, el cual es la línea base de este trabajo resultó en 1,147 kcal/kg clinker, debido principalmente a la variabilidad en la materia primas. Luego de implementar la gestión de energía mediante estrategias de mejora, el consumo se redujo en 15 kcal/kg clinker. Si bien, se ha tenido una reducción considerable todavía hay oportunidad de mejora para seguir optimizando el consumo térmico. En el caso del molino de cemento el año 2023 el consumo eléctrico específico fue de 51.06 kWh/t, y luego de implementar el SGE se redujo en 3.06 kWh/t. Según Martínez (2017), el consumo eléctrico en un molino de bolas de cemento es alrededor de 52 kWh/t, por lo que actualmente estamos 4 kWh/t por debajo del promedio. Esto permite seguir evaluando oportunidades de mejora para reducir el consumo eléctrico.

El ahorro interanual obtenido por la implementación de estrategias operativas en molino de cemento comparando el segundo semestre del 2024 con el segundo semestre del 2023 fue de 3.06 kWh/t o 6.1%. Si bien este valor es menor al 20% de ahorro energético anual propuesto por Mendoza et al. (2023), es importante entender que su trabajo propone cambiar los motores antiguos por equipos de alta eficiencia, así como la instalación de variadores de velocidad, representando una alta inversión inicial que se paga en casi tres años. En contraste de lo mencionado por Bernabé et al. (2023b), quienes presentan un ahorro de 8% en los costos energéticos, debido a la implementación del SGE, mediante la

identificación y corrección de malas prácticas operativas en relación con el manejo de la energía. Este enfoque resalta la efectividad de las buenas prácticas energéticas, el cual también se relaciona con lo mencionado por ONUDI (2015), quien muestra una disminución de los consumos energéticos en un 50% debido a uso eficiente del aire comprimido en planta. Estas estrategias se alinean con lo desarrollado en este trabajo, dado que enfoca en mejorar las practicas operativas y fomentar la innovación, mediante el uso de aditivos de alto rendimiento.

El ahorro interanual obtenido por la implementación de estrategias operativas en el horno de clinker comparando el segundo semestre del 2024 con el segundo semestre del 2023 fue de 15 kcal/kg clinker o 4.1% en un periodo de seis meses. Las estrategias realizadas en este trabajo como parte de la gestión de energía son similares a lo propuesto por Gilvonio (2005), quien menciona un ahorro del 10% en los costos de producción, mediante el uso de nuevos fundentes y cambios en los refractarios. Asimismo, los resultados se refuerzan con lo mencionado por Calla & Maldonado (2023b), quienes muestran un ahorro en los costos térmicos del 14.38%, a través de la capacitación al personal operativo y el uso eficiente del combustible. En contraste, Sahoo et al. (2022b) propusieron un ahorro del 8% en el consumo térmico, mediante el cambio en el diseño del enfriador de clinker, sin embargo, esto último requiere alta inversión inicial y actualmente no hay presupuesto designado para esta actividad. No obstante, las estrategias mostradas van en línea con lo propuesto en este trabajo, algunas realizables a corto plazo y otras a mediano plazo.

Según MINEM (2017), menciona que la molienda de cemento representa el 41% del consumo eléctrico total de planta y este consumo depende de la eficiencia de los motores y la distribución correcta del tamaño de bolas en el molino. En este trabajo se identificó que los equipos principales de la sección de cemento son el motor principal, el del separador y el del aspirador del filtro, que representan el 89 % del consumo eléctrico total, debido a su alto consumo eléctrico. El motor principal del molino de cemento consume

alrededor de 1,180 kWh y tiene un factor de potencia de 0.85, por debajo de lo indicado por Incio (2019), quien menciona que los motores deben tener un factor de potencia por encima de 0.92. Si bien, es posible mejorar el consumo por el cambio de motor a uno de alta eficiencia, este trabajo se va a enfocar en reducir el consumo específico mediante estrategias que no requieran inversión inicial, tales como mejorar las prácticas operativas para aumentar el rendimiento del molino.

Conclusiones

La implementación de estrategias operativas como parte de la gestión de energía permitió reducir el consumo energético en las secciones de hornos y molino de cemento, cumpliendo con el objetivo general de este trabajo. Las acciones estuvieron alineadas con la norma ISO 50001.

El ahorro térmico obtenido debido a la implementación de la gestión de energía en el horno de clinker fue de S/ 151,842, al comparar el segundo semestre del 2024 con el segundo semestre del 2023. Este valor representa una disminución del 4.1% en el consumo térmico. Siguiendo esa proyección se puede estimar el doble de ahorro al año.

El ahorro eléctrico obtenido debido a la implementación de la gestión de energía en el molino de cemento fue de S/ 89,055, al comparar el segundo semestre del 2024 con el segundo semestre del 2023. Este valor representa una disminución de. 6.1% en el consumo eléctrico.

La ejecución e implementación de las mejores prácticas operativas como parte de la excelencia operacional tanto en el horno como en el molino demostró ser efectiva, y permitió un ahorro interanual S/ 240,897, comparando el segundo semestre del 2024 con el segundo semestre del 2023. Esto es importante debido a que fueron acciones que no requirieron inversión inicial, sin embargo, el impacto sobre la reducción del consumo energética fue considerable.

Recomendaciones

Difundir las buenas prácticas operativas aplicadas en las secciones de molinos y hornos a las otras secciones de la planta, mediante un programa de transferencia de conocimiento estructurado, donde esté presente todo el personal operativo.

Continuar con las pruebas de dosificación de aditivo para mejorar el rendimiento del molino, haciendo seguimiento al comportamiento de las variables operativas. Complementándolo con pruebas en laboratorio y en paralelo buscar más proveedores de aditivo de alto rendimiento.

Realizar un análisis detallado de la influencia de las variables operativas en la finura de la harina cruda, buscando optimizar la combustión. Actualmente se tiene modelos de predicción aplicados a la optimización.

Implementar de manera diaria un reporte de seguimiento energético en todas las secciones de planta, permitiendo la identificación temprana de desviaciones que afecten al rendimiento energético. Actualmente se tiene seguimiento mensual de los indicadores, sin embargo, la implementación de indicadores diarios energéticos en casa sección mejoraría el control.

Implementar la ISO 50001, si bien, se tiene un sistema de energía estructurado con indicadores, la adopción de la norma internacional mejoraría el plan de control y seguimiento, mediante las auditorías periódicas

Evaluar el uso de combustible alternos, como aceites residuales y biomasa, alineado a la política ambiental de sostenibilidad.

Referencias bibliográficas

- AGICO CEMENT. (2025, March 17). *Horno de eje*. AGICO CEMENT. <https://cementplants.es/clinker-production/shaft-kiln/>
- Ahmed, F., Thabrit, F., Awadh, N., Musallam, Y., & Sivamani, S. (2024). Energy Conservation in Cement Manufacturing: Challenges, Opportunities, and Sustainable Practices. *International Journal of Advanced Multidisciplinary Research and Studies*, 4(4), 319–325. <https://doi.org/10.62225/2583049X.2024.4.4.3044>
- Alarcón, M., Martínez, F., & Gómez, F. (2021). Energy and maintenance management systems in the context of industry 4.0. Implementation in a real case. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 142, 110841. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110841>
- António da Silva, V., & Mil-Homens, F. (2019). Energy management system ISO 50001:2011 and energy management for sustainable development. *Energy Policy*, 133. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.07.004>
- Antunes, M., Santos, R., Pereira, J., Rocha, P., Horta, R., & Colaço, R. (2022). Alternative clinker technologies for reducing carbon emissions in cement industry: A critical review. In *Materials* (Vol. 15, Issue 1). MDPI. <https://doi.org/10.3390/ma15010209>
- Aouragh, M., & Bouteldja, D. (2024). The Impact of Implementing Energy Management System According to International Standard ISO 50001:2018 on Energy Performance of Industrial Companies: Case Study of Ain Touta Cement Company (SCIMAT). *Finance and Business Economics Review*, 8(2), 73–85. <https://doi.org/10.58205/fber.v8i2.1833>
- ARGOS. (2024). *Ingeniería del Cemento* (pp. 1–27).

- Beltrán, J., Quintero, M., López, D., & Carvajal, S. (2022). Energy Management Systems in Latin American Industry: Case Study Colombia. *Tecnológicas*, 25(54), e2379. <https://doi.org/10.22430/22565337.2379>
- Bernabé, M., Marín, W., Andrade, D., Neri, A., Ausejo, J., Muñoz, A., Ramos, S., Campos, A., & Diaz, E. (2023a). Energy efficiency management according to ISO 50001: A case study in the brick industry. *EAI Endorsed Transactions on Energy Web*, 10. <https://doi.org/10.4108/ew.3560>
- Calla, M., & Maldonado, R. (2023a). Diagnóstico energético como elemento de gestión energética: caso de estudio Empresa Industrial Tapia SAC. *Ñawparisun - Revista de Investigación Científica*, 3(Vol. 4, Num. 3), 67–75. <https://doi.org/10.47190/nric.v4i3.261>
- Cantini, A., Leoni, L., De Carlo, F., Salvio, M., Martini, C., & Martini, F. (2021b). Technological Energy Efficiency Improvements in Cement Industries. *Sustainability*, 13(7), 3810. <https://doi.org/10.3390/su13073810>
- Carbosystem. (2025). *Tipos de hornos industriales*. Carbosystem. <https://carbosystem.com/tipos-de-hornos-industriales/>
- Castillo, J., Ospina, M., & Ortiz, P. (2022). Horno cementero rotatorio: una revisión al control mediante sistemas expertos. *TecnoLógicas*, 25(55), e2391. <https://doi.org/10.22430/22565337.2391>
- Castillo, P. (2024). Manual Práctico de Combustión y Clinkerización. In *Clinkerización*.
- Cementos Argos. (2021, April 12). *Cementos Argos recibe reconocimiento de eficiencia energética en Estados Unidos*. Cementos Argos. <https://argos.co/cementos-argos-recibe-reconocimiento-de-eficiencia-energetica-en-estados-unidos/>

- Colchado, Y. (2025). *Implementación del sistema de gestión energética ISO 50001 en planta de aceite residual de 165 Tn de capacidad* [UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA]. <https://repositorio.uns.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14278/4935/Tesis%20Colchado.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Dirección General de Eficiencia Energética-MINEM. (2017). *Guía de Orientación del Uso Eficiente de la Energía y de Diagnóstico Energético-Industrias Cementeras*. Ministerio de Energía y Minas.
- Doh, C., & Wen, Z. (2021). Many-objective optimization of energy conservation and emission reduction in China's cement industry. *Applied Energy*, 304, 117714. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117714>
- EREN. (2013). Aplicación de un Sistema de Gestión Energética en el Sector Industrial. In Junta de Castilla y León (Ed.), *Energy* (pp. 1–132).
- Fernández, C.; B. P. (2014). *Metodología de la Investigación* (Interamericana Editores S.A, Ed.; Sexta). Mc Graw Hill Education.
- FONAM. (2009). Manual de Eficiencia Energética. In *Energy* (pp. 1–325). FONAM.
- Gilvonio, L. (2005). *El ahorro de energía en la industria cementera como estrategia de la excelencia operativa*. [Tesis de Maestría]. Universidad Mayor de San Marcos.
- GIZ. (2025). Red de aprendizaje en Sistemas de Gestión de Energía. In *Sostenibilidad*. Cooperación Técnica Alemana.
- HOLCIM. (2024, March 5). *Holcim celebra el Día Mundial de la Eficiencia Energética, con una propuesta integral para descarbonizar la construcción*. HOLCIM COLOMBIA. <https://www.holcim.com.co/holcim-celebra-el-dia-mundial-de-la-eficiencia-energetica-con-una-propuesta-integral-para>

- IMO. (2016). Train the Trainer (TTT) course on Energy Efficient Ship Operation. In *International Maritime Organization, Module*.
<https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/IMO-Train-the-Trainer-Course.aspx>
- Incio, W. (2019). *Sistema de gestión energética basado en ISO 50001 para mejorar la eficiencia energética del Molino El Agricultor* [Tesis de grado]. Universidad César Vallejo.
- 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>
- Martínez, Á. (2017). *Desarrollo de Ingeniería Básica y de detalle en Instrumentación y Automatización de un Molino Vertical de Cemento* [Título profesional de Ingeniero Electrónico]. Universidad Nacional de San Agustín.
- Mendoza, C, Cruz, L., & Zelada, D. (2023a). Reduction of energy costs based on the ISO 50001 standard in refrigeration systems to increase the profitability of an agroindustrial company in Peru. *Reduction of Energy Costs Based on the ISO 50001 Standard in Refrigeration Systems to Increase the Profitability of an Agroindustrial Company in Peru*. <https://doi.org/10.18687/LACCEI2023.1.1.1091>
- Mishra, U, Sarsaiya, S., & Gupta, A. (2022). A systematic review on the impact of cement industries on the natural environment. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(13), 18440–18451. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-18672-7>
- Naveen, X, Arivoli, A., Boopathi, S., & Rajkumar, V. (2022). *A Case Study on Evaluation of Energy Management System by Implication of Advanced Technology in Typical Cement Factory Tamil Nadu, India* (pp. 245–265). https://doi.org/10.1007/978-3-030-80702-3_15



- Nonalaya, M. (2020). *Modelo de gestión de la energía, para disminuir los costos productivos del horno N°3, En la empresa cementera UNACEM S.A.A* [Tesis de Maestría]. Universidad Nacional del Centro del Perú.
- NQA. (2021). *ISO 50001:2018 Energy management system implementation guide*. <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwiW2f2v-rmLAXrjpUCHfTwLokQFnoECBAQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.nqa.com%2Fmedialibraries%2FNQA%2FNQA-Media-Library%2FPDFs%2FNQA-ISO-50001-Implementation-Guide.pdf&usg=AOvVaw2J-TlwZyFh2TNIh4Tu04AH&opi=89978449>
- NQA. (2024). *Gestión energética*. <https://www.nqa.com/es-pe/resources/glossary/energy-management>
- Nurprawito, D., Maila, E, Nurcahyo, R., Bagaskara, R, Satria, Y., & Zihni, dan (2023, March 9). Review on Sustainable Energy Implementation in Indonesian Cement Industry. *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*. <https://doi.org/10.46254/AN13.20230221>
- ONUDI. (2015). *Guía Práctica para la Implementación de un Sistema de Gestión de la Energía*. www.unido.org
- Pelser, W, Vosloo, J, & Mathews, M (2018a). Results and prospects of applying an ISO 50001 based reporting system on a cement plant. *Journal of Cleaner Production*, 198, 642–653. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.071>
- Prasetya, B., Wahono, D., Dewantoro, A., Anggundari, W., & Yopi. (2021). The role of Energy Management System based on ISO 50001 for Energy-Cost Saving and Reduction of CO₂-Emission: A review of implementation, benefits, and challenges. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 926(1), 012077. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/926/1/012077>

- Prato, N. (2007). *Química del Cemento*.
- Rodríguez, M. (2021). *ISO 50001: Sistema de Gestión Energética*. Geoinnova.
<https://geoinnova.org/blog-territorio/iso-50001-sistema-de-gestion-energetica/>
- Sahoo, N., Kumar, A., & Samsheer. (2022a). Review on energy conservation and emission reduction approaches for cement industry. *Environmental Development*, 44, 100767.
<https://doi.org/10.1016/j.envdev.2022.100767>
- Santamaria, J. (2023). *Diseño de un sistema de gestión de la energía basado en la Norma ISO 50001 para mejorar la eficiencia energética en la Molinera Sudamérica SAC Lambayeque-2018* [Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo].
<https://tesis.usat.edu.pe/handle/20.500.12423/7080>
- Walter, L., & Duda, H. (1977). *Manual Tecnológico del Cemento*.
- Worrell, E., & Galitsky, C. (2008). Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for Cement Making Managers. In *ENERGY STAR* (pp. 1–75). ENERGY STAR.

Anexos

Anexo 1: Plantilla de implementación de mejoras energéticas	1
Anexo 2: Cálculo del calor que ingresa al sistema de clinkerización	2
Anexo 3: Calibración del equipo LECO	4

Anexo 1: Plantilla de implementación de mejoras energéticas

OM01		Disminuir el consumo térmico de los hornos	
<p>PROBLEMÁTICA </p> <p>●</p>		<p>OWNER</p> <p>Operaciones</p>	<p>ÁREAS INVOLUCRADAS & CLIENTES INTERNOS</p> <ul style="list-style-type: none"> • Producción • Mantenimiento • Procesos • Control de calidad
		<p>PRIORIDAD</p> <p>Media</p>	<p>METRICAS E INDICADORES</p>
<p>SOLUCIÓN </p> <p>●</p> <p><u>Pasos a seguir:</u></p>		<p>SISTEMAS IMPACTADOS</p>	<p>REQUISITOS</p>
		<p>COMPLEJ.</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Alta ● Media ● Baja 	<p>RELACIONADO CON INICIATIVAS INTERNAS</p>
IMPLICANCIAS			
SEGURIDAD		PRESUPUESTO	AHORRO

Anexo 2: Cálculo del calor que ingresa al sistema de clinkerización

Calor entregado por la combustión del carbón:

$$Q_1 = C \cdot \text{PCI} \quad (\text{kcal/kg clinker})$$

C = Consumo específico (kg carbón/kg Clinker)

PCI = Poder calorífico inferior (kcal/kg)

$$Q_1 = (1.97) (6047) / 10.43 = 1147 \text{ kcal/kg clinker}$$

Calor sensible del carbón

La cantidad de calor entregada es:

$$Q_2 = C \cdot C_{pc} \times (T_c - T_r) \quad (\text{kcal/kg Clinker})$$

Para el carbón el calor específico:

$$C_{pc} = 0,41 + 0,00043 T \quad (\text{kcal/kg.}^\circ\text{C})$$

Dónde: T = Temperatura ($^\circ\text{C}$) = 20 $^\circ\text{C}$

$$Q_2 = (1.97) (0.4358) (60-20) = 2.9 \text{ kcal/kg clinker}$$

Calor sensible de la harina cruda

La Harina crudo-alimentada al horno entra una temperatura T_1 , entonces el calor sensible es:

$$Q_3 = M \cdot (1-X) \cdot C_{ph} \cdot (T_1 - T_r) \quad (\text{kcal/kg clinker})$$

Calor específico del crudo:

$$C_{ph} = 0,21 + 0,00007 T \quad (\text{kcal/kg.}^\circ\text{C})$$

$$Q_3 = (18) (0.2142) (60-20) = 12.9 \text{ kcal/kg clinker}$$

Calor sensible del aire de enfriamiento

Flujo de aire primario es F_1 (kg aire/kg clinker), entonces:

$$Q_4 = F_1 \cdot C_{pA} \times (T_A - T_r) \quad (\text{kcal/kg clinker})$$

Considerando el calor específico del aire:

$$C_{pA} = 0,247 + 4,4 \cdot 10^{-5} T \quad (\text{kcal/kg clinker})$$

$$Q_4 = (18.30) (0.248) (28-20) = 1.3 \text{ kcal/kg clinker}$$

$$Q \text{ total suministrado} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 = 1164.1 \text{ kcal/kg clinker}$$

Anexo 3: Calibración del equipo LECO

Fecha: 10/03/2025

DATOS DE IDENTIFICACIÓN	
EQUIPO / INSTRUMENTO:	CALDRÍMETRO
CÓDIGO DE IDENTIFICACIÓN:	15M02253
ASIGNACIÓN:	RIO_Laboratorio Físico
TIPO DE VERIFICACIÓN	Interna
PROCEDIMIENTO:	Lectura de estándar de Acido Benzoico en el Equipo LECCO
CONDICIONES AMBIENTALES	
HUMEDAD RELATIVA:	84 %
TEMPERATURA:	22.3 °C
RESPONSABLE DE EJECUCIÓN:	YBERNAOLA

Resultados:

Fecha	Patrón	Lote	Valor Certificado (cal/g)	Medición	Valor Leído (cal/g)	¿Requiere calibración?	Valor corregido (cal/g)	Código Bomba Calorimétrica	Número de Análisis
10/03/25	RIO_ACIDO BENZOICO	100	[6310 - 6324]	1	6328.36	Cierto	6317.17	-	-
				2	6314.14	Cierto	6317.21		
				3	6323.11	Falso	-		