



Revisión de las medidas en pro de la eficiencia energética y la sostenibilidad de la industria del cemento a nivel mundial

Review of energy efficiency and sustainability measures in the cement industry worldwide

Carlos Aristizábal-Alzate ¹, José González-Manosalva ²

¹ Grupo de Investigación Materiales Avanzados y Energía (Matyer), Instituto Tecnológico Metropolitano de Medellín, Colombia. Correo electrónico: carlosaristizabal207157@correo.itm.edu.co. Orcid: 0000-0002-8970-6389

² Grupo de Investigación en Química Básica y Ambiente (Alquimia), Instituto Tecnológico Metropolitano de Medellín, Colombia. Correo electrónico: josegonzalez@itm.edu.co Orcid: 0000-0002-0625-3362

Recibido: 22 septiembre, 2020. Aceptado: 30 enero, 2021. Versión final: 7 mayo, 2021.

Resumen

El presente artículo contempla una revisión bibliográfica de las medidas que pueden llevarse a cabo dentro de la industria de producción de cemento, para hacer un consumo racional y eficiente de los recursos energéticos demandados, y, al mismo tiempo, mejorar los indicadores de sostenibilidad, gracias a la disminución en la emisión de contaminantes y GEI. La revisión inicia con la caracterización de esta industria a nivel mundial, consumos específicos, procesos, equipos y materias primas, para establecer en cuáles etapas del proceso existen oportunidades de mejora en el consumo energético. Posterior a esto, se describen las medidas en eficiencia energética de los equipos macroconsumidores de energía, como lo es el horno de producción de clinker. Por último, se muestran posibles sustitutos a los combustibles fósiles convencionalmente usados y tecnologías que aprovechan las energías renovables, con el fin de buscar una industria eficiente y sostenible.

Palabras clave: industria del cemento; combustible alternativo; producción de clinker; eficiencia energética; recuperación de energía; GEI.

Abstract

This article provides a bibliographic review of the measures that can be taken within the cement production industry. This to make rational and efficient consumption of the energy resources demanded, and at the same time improve sustainability indicators thanks to the reduction in the emission of pollutants and GHGs. The review begins with the characterization of this industry at a global level; specific consumption, processes, equipment, and raw materials, to establish in which stages of the process there are opportunities for improvement in energy consumption. Afterward, the energy efficiency measures of the macro-consuming equipment are described, such as the clinker production furnace. Finally, possible substitutes to conventionally used fossil fuels and technologies that take advantage of renewable energies are shown, to seek an efficient and sustainable industry.

Keywords: cement industry; alternative fuels; clinker manufacturing; energy efficiency; energy recovery; GHG.

ISSN impreso: 1657 - 4583. ISSN en línea: 2145 - 8456, **CC BY-ND 4.0**

Como citar: C. Aristizábal-Alzate, J. González-Manosalva, "Revisión de las medidas en pro de la eficiencia energética y la sostenibilidad de la industria del cemento a nivel mundial," *Rev. UIS Ing.*, vol. 20, no. 3, pp. 91-110, 2021, doi: [10.18273/revuin.v20n3-2021006](https://doi.org/10.18273/revuin.v20n3-2021006)

1. Introducción

El cemento es consumido por la sociedad a una tasa anual de 3×10^{12} kg y es responsable de la liberación de 9 kg de CO_2 por cada 10 kg de cemento producido [1]. Además, la industria del cemento es uno de los mayores consumidores de energía del mundo, ya que en ella se invierte entre un 12 y un 15 % del total de la energía destinada para uso industrial, la cual equivale a un 30 y un 70 % del total de la energía consumida por toda la humanidad [2]-[4]. Además, es la segunda fuente antropogénica de gases efecto invernadero (GEI) [5]-[7], con cerca del 5 % del total de los GEI del planeta, solamente superada por la industria del acero [5], [8], [9].

Por otro lado, las emisiones de CO_2 de esta industria dependen en su mayoría del tipo de combustible fósil usado para suplir la demanda energética del proceso productivo, la cantidad y el tipo de combustibles alternativos para reemplazar de forma parcial o total el uso de combustibles fósiles y el tipo de horno en el que se lleva a cabo la descomposición térmica del CaCO_3 [5], [7], [10].

Debido al alto porcentaje de los costos operacionales que representa el consumo de energía por parte de esta industria, los cuales varían entre un 20 y un 40 % de los costos totales [8], [9], [11], [12], y a que su principal producto, el cemento, es una materia prima fundamental para el desarrollo económico, ya que es necesario para la modernización de las ciudades y la construcción de nuevas obras de infraestructura [4], se espera que los requerimientos de recursos energéticos, así como las emisiones de CO_2 , se incrementen en los próximos años [2], [5].

Por estas razones, que se deben implementar acciones que vayan en pro de la eficiencia energética, el uso racional y adecuado de los recursos y materias primas y la disminución de las emisiones de GEI en esta industria [2], [5], [13] y otros contaminantes tales como los NO_x , material particulado y dioxinas [9], [14].

El objetivo de este estudio es identificar las medidas y opciones tecnológicas específicas de eficiencia energética y de la implementación de energías renovables, que vayan en pro del ahorro en el consumo energía en la industria de producción de cemento y que puedan ser aplicadas y adoptadas por las empresas manufactureras de este producto tan esencial para el desarrollo económico. Además, de incluir algunas alternativas que reduzcan las emisiones de CO_2 en esta industria, ya que el consumo de energía térmica está íntimamente relacionado con este indicador, haciendo el proceso menos contaminante para el medio ambiente.

2. Metodología para la revisión sistemática de literatura

Este artículo ofrece una revisión sistemática de la literatura y un análisis bibliométrico de trabajos de la industria del cemento publicados en los últimos 10 años, relacionados con medidas que impacten positivamente en la eficiencia de los procesos, basadas en investigaciones en pro de la eficiencia energética y la reducción de gases de efecto invernadero. La base de datos de Scopus® ha sido elegida para la búsqueda bibliográfica, ya que esta recopila gran parte de la investigación pura y aplicada, y cuenta con herramientas *online* de análisis de información [15].

La búsqueda se ha centrado en artículos de investigación revisados por expertos y revisiones publicadas en revistas indexadas, con el fin de recopilar documentos de investigación de alta calidad y evidenciar la importancia que ha tomado en el ámbito investigativo. La búsqueda en la base de datos utilizó las siguientes palabras clave en el pseudo código: "TITLE-ABS-KEY (cement AND kiln AND industry OR energy OR clinker AND efficiency OR co_2 AND emission)". La figura 1 presenta los resultados analizados con las herramientas de análisis en línea de Scopus®.

De acuerdo con la figura 1, se evidencia que en la industria del cemento se están realizando actividades en investigación, desarrollo e innovación intensivamente en el área de la eficiencia energética y mitigación en la emisión de GEI y contaminantes, ya que para el año 2000 se contaban con 3 documentos y para el año 2020, con 31 documentos, lo que implica un aumento del 933 % en la generación de nuevo conocimiento.

En la figura 2 se muestra el número de documentos publicados en revistas especializadas e indexadas por país de economías desarrolladas, entre el periodo 2000 y 2020.

Por otro parte, la figura 3 muestra el número de documentos publicados en revistas especializadas e indexadas para países de economías emergentes o en vías de desarrollo, entre el periodo 2000 y 2020.

La información contenida en la figura 2 muestra la intención de los países desarrollados y con economías sólidas en la investigación en actividades relacionadas con el uso racional de la energía, mitigación de emisiones de gases efecto invernadero (GEI) y con la sostenibilidad de la industria del cemento, ya que es bien conocido que este tipo de medidas ayudan a reducir el consumo de energía y las emisiones de gases de efecto invernadero, al tiempo que logran mantener la calidad del aire a un

costo menor [16] y una reducción de los costos operacionales, sobre todo en industrias de altas demandas de energía térmica y eléctrica.

Por el contrario, los países en vías de desarrollo ilustrados en la figura 3 muestran una investigación baja en los campos mencionados, debido a algunas barreras de tipo económico y tecnológico [17].

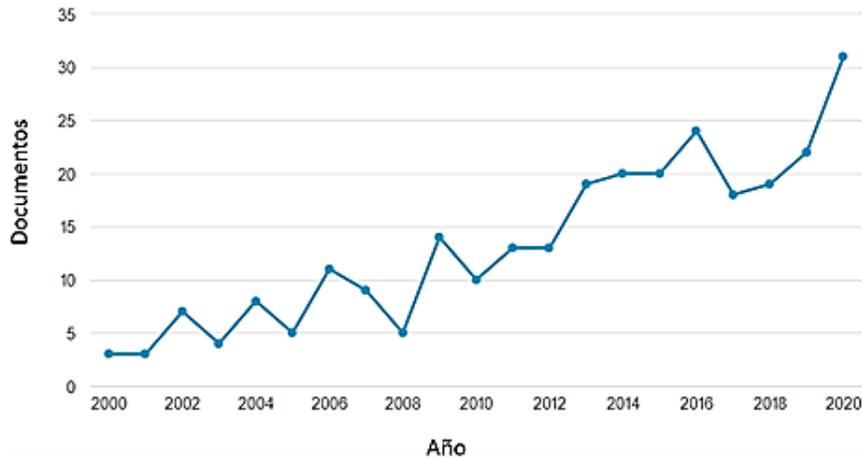


Figura 1. Número de investigaciones y trabajos escritos entre el año 2000 y el 2020, en las áreas de la eficiencia energética y mitigación de emisiones de CO₂, para plantas de producción de cemento. Fuente: [15].

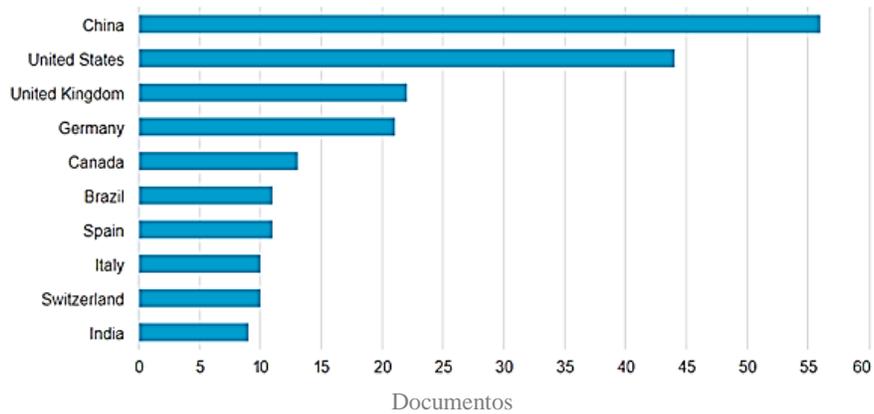


Figura 2. Número de documentos para economías desarrolladas. Fuente: [15].

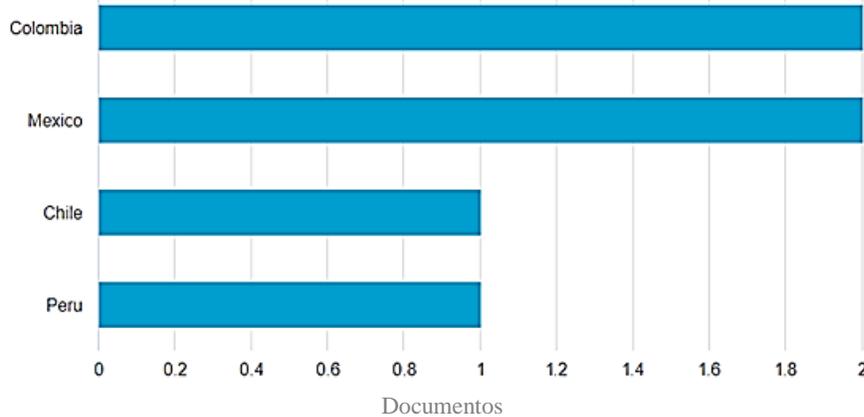


Figura 3. Número de documentos para economías emergentes. Fuente: [15].

Sin embargo, en años recientes se ha incrementado la actividad investigativa alrededor de la industria del cemento [15], [18].

Con respecto a las temáticas abordadas en los 278 artículos publicados entre el 2000 y el 2020, 142 se publicaron en el área de la ingeniería; 106, en ciencias ambientales y 66, en el campo de la energía [15]. Esto significa que la investigación en eficiencia energética y en medidas de mitigación en la emisión de contaminantes seguirán siendo de altísima relevancia para la industria de producción de cemento, sobre todo, por los acuerdos pactados a nivel mundial en cambio climático, y la necesidad imperativa de utilizar los recursos naturales de una manera racional y sostenible [19], [20].

Por otro lado, en la Figura 4 se ilustra número de investigaciones y trabajos escritos entre el año 2000 y el 2020, en las áreas de la eficiencia energética y mitigación de emisiones de CO₂, para plantas de producción de cemento.

Según la figura 4, las revistas con más publicaciones acumuladas en el tema entre el 2000 y el 2020 son: *Journal of Cleaner Production* (18), *Energy* (11), *World Cement* (9), *Cement International* (7), *IEEE Cement Industry Technical Conference Paper* (6) y *Cement And Concrete Research* (4) [15].

Sin embargo, las revistas relacionadas con sostenibilidad y energía han presentado picos de publicación en los últimos años, debido al creciente interés en temas relacionados con medidas de mitigación y remoción de GEI y de contaminantes, uso racional y eficiente de los recursos en industrias intensivas en el consumo de energía y en transición energética por cuenta de

problemáticas asociadas al cambio climático y de las emisiones de GEI antropogénicas, de las cuales la industria del cemento es responsable en parte [21].

3. Proceso de producción de cemento

El proceso de producción de cemento puede describirse en tres etapas fundamentales [22]-[24]. Primero, la explotación en canteras de las arcillas y la piedra caliza, principal materia prima del proceso, seguido de una homogenización y premolienda de esta piedra. En la actualidad, los países alrededor del mundo, por lo general, utilizan piedra caliza natural para producir cemento, que se compone de 98,5 % de CaCO₃ y 1,5 % de MgCO₃ [25].

En la etapa 2, las materias primas preparadas pasan a un horno rotatorio, en donde se presenta la descomposición térmica de la caliza o calcinación ($\text{CaCO}_3 + \text{calor} = \text{CO}_2 + \text{CaO}$), con ayuda de un combustible fósil, comúnmente carbón [5], [26], se suministra al proceso la energía necesaria para alcanzar las altas temperaturas, mayores a los 1450 °C [14], para llevar a cabo el proceso de producción de clinker. Finalmente, el material obtenido en la etapa anterior es enfriado a una temperatura cercana a los 90 °C [27] y mezclado con coadyuvantes, por ejemplo, el yeso, para dar como producto final el cemento. Posteriormente, este material es empacado y transportado a los diferentes lugares y puntos de venta [17].

En la figura 5 se describen los diferentes subprocesos involucrados en la manufactura del cemento.

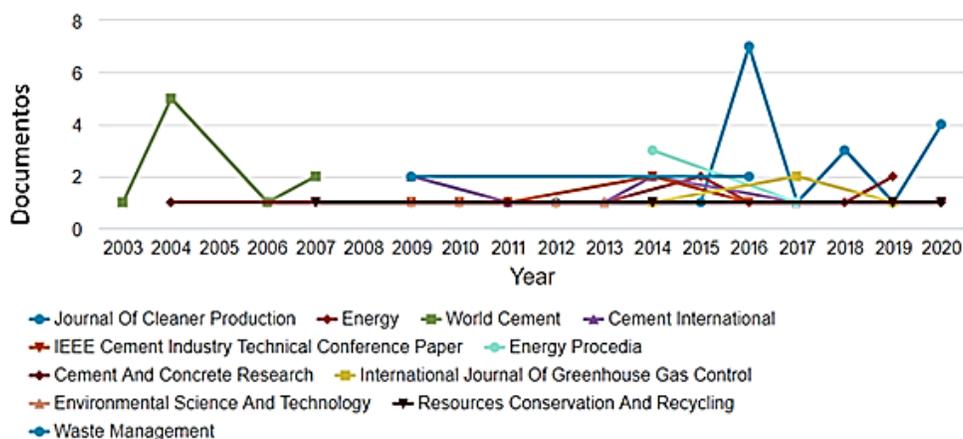


Figura 4. Número de investigaciones y trabajos escritos por recurso entre el año 2000 y el 2020, en las áreas de la eficiencia energética y mitigación de emisiones de CO₂, para plantas de producción de cemento. Fuente: [15].

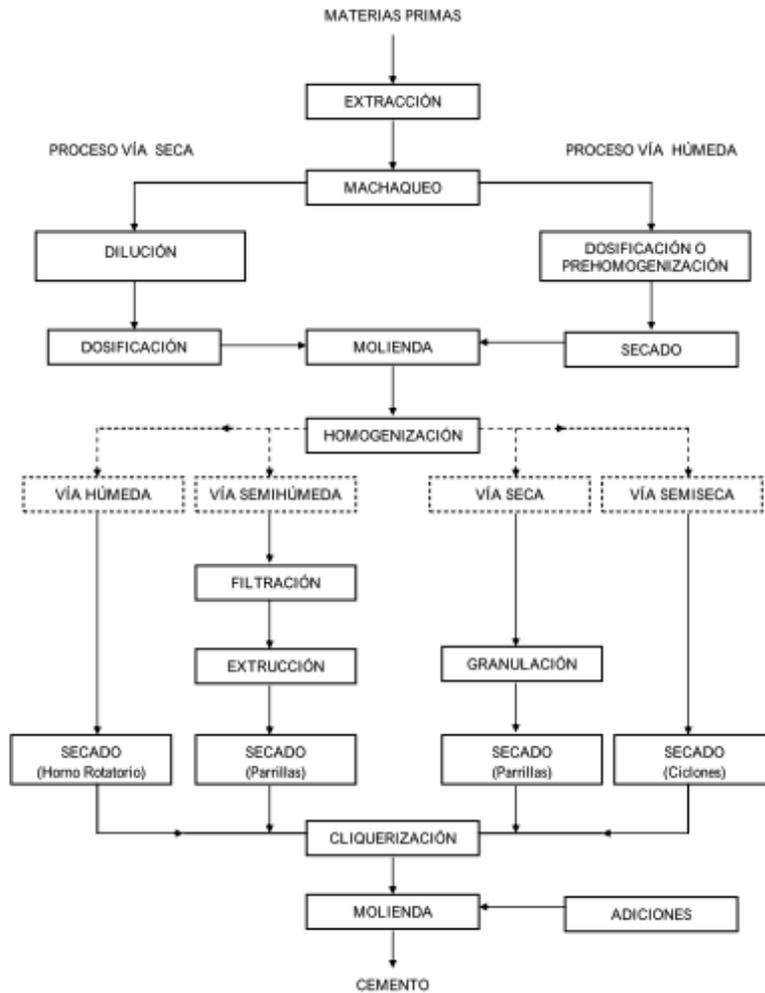


Figura 5. Diagrama de bloques del proceso de producción seco y húmedo del cemento. Fuente: [11].

Adicionalmente, se encontraron procesos novedosos en los cuales se utilizaron materiales que sustituyen parcialmente la cantidad de caliza.

Por ejemplo, se ha demostrado que un 14 % en la sustitución por lodos secos de aguas residuales de las materias primas posibilita el ahorro en caliza, arcilla y combustible; y una sustitución del 15 % promueve la formación del C_2S ($2CaO.SiO_2$), compuesto que ayuda a prolongar el tiempo de fraguado del cemento [28], [29].

4. Consumo energético de la industria del cemento

La producción de cemento requiere una serie de etapas sucesivas de pretratamiento, tratamiento y transformación, las cuales requieren del consumo de energía eléctrica y térmica para llevarse a cabo [21]. A nivel mundial, esta demanda constituye el 3 % del total de la energía generada [30].

El consumo energético específico de esta industria oscila entre un 4,03 y 6,51 GJ/ton de clinker [6]. Para el proceso en seco, el consumo específico es de aproximadamente 3,40 GJ/ton y 5,29 GJ/ton para el proceso en húmedo [2].

En la figura 6 se ilustra el diagrama de flujo energético del proceso de manufactura de Cemento.

Según la figura 5, el 91,6 % de la energía suministrada se utiliza en procesos térmicos. Por lo tanto, las medidas que se adopten en eficiencia energética, uso racional de los recursos y reconversión tecnológica deben aplicarse en este segmento del proceso productivo, ya que conducirían a un menor consumo de combustibles, menores emisiones de GEI, entre otros beneficios económicos y ambientales [12], [16], [31].

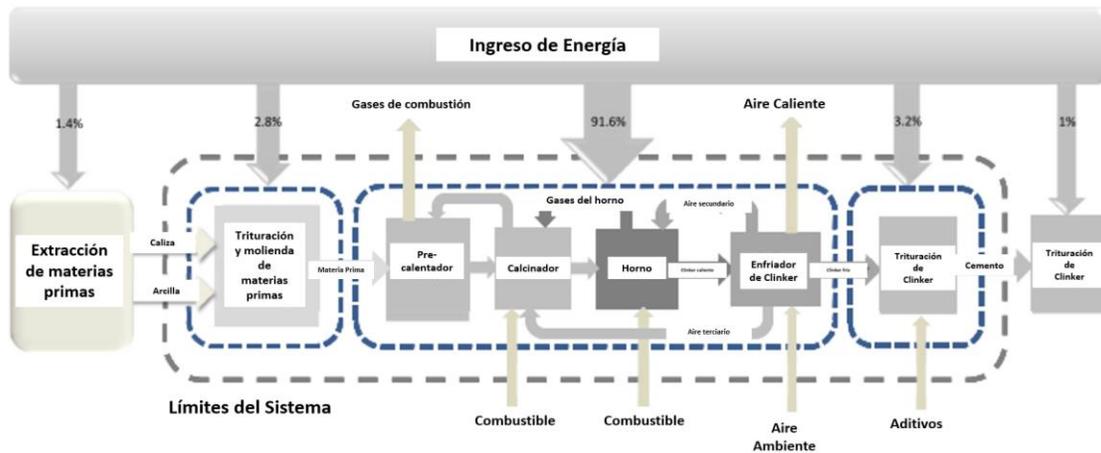


Figura 6. Flujo de energía en el proceso de producción de Cemento. Fuente: [27].

Adicionalmente, en la tabla 1 se muestra el tipo de recurso energético que utilizan las etapas y equipos en el proceso de manufactura del cemento. Esta caracterización se basa en la descripción de los equipos y proceso de fabricación de cemento establecida por [32].

Tabla 1. Descripción de los consumidores de energía en la producción de cemento

Etapa	Recurso energético	Entradas/salidas
Transporte materias primas	Combustibles fósiles	Materiales
Triturado	Electricidad	Materiales
Zona de premezclado	Electricidad	Materiales
Molino de crudo	Electricidad	Materiales
Generador de gas caliente	Térmico	Gases
Silos de homogenización	Electricidad	Materiales
Ventilador principal del horno	Electricidad	Aire
Filtro del horno	Electricidad	Aire
Pre calentador y precalcinador	Térmico	Materiales
Ventiladores del horno	Electricidad	Aire
Quemadores del horno	Combustibles fósiles	Gases y materiales
Enfriador de clinker	Electricidad	Materiales
Filtro del enfriador	Electricidad	Gases y material particulado
Almacenamiento de clinker	Electricidad	Materiales
Molinos de cemento	Electricidad	Materiales
Silos de cemento	Electricidad	Materiales
Empacado de cemento	Electricidad	Materiales
Transporte al lugar de venta	Combustibles fósiles	Materiales

Fuente: [32].

Con la ayuda de la Tabla 1 se identifican las medidas más adecuadas a implementar según el tipo de equipo y recurso utilizado.

4.1 Panorama mundial del consumo energético de la industria del cemento

En la industria del cemento se tiene que una planta bien equipada y con hornos eficientes presenta un consumo específico de energía térmica en promedio de 2,95 GJ por tonelada de cemento producido, y para plantas de cemento menos avanzadas puede exceder los 5 GJ/ton [33]. Sin embargo, este consumo específico varía de país a país, por ejemplo, en países como la India este valor está en 3,06 GJ/ton, mientras que en otros países este valor puede ser menor a 2,95 GJ/ton [2]. Otros estudios muestran que para Latinoamérica el consumo de energía térmica está por encima del resto del mundo, sin embargo, en años más recientes estos consumos se han ido igualando (ver figura 7).

En la figura 8 se muestran los consumos específicos de energía térmica y eléctrica para la industria manufacturera de cemento por país.

Esta variabilidad en el consumo energético se debe principalmente a la calidad de los combustibles fósiles, a la dureza y composición de las materias primas minerales [2] y al acceso a tecnologías más eficientes en términos de consumo energético. Por este motivo, se analizarán los estudios de caso realizados en los países con menores consumos específicos de energía térmica y eléctrica, para revisar las medidas y tecnologías implementadas en pro la de eficiencia energética y la disminución de las emisiones de GEI.

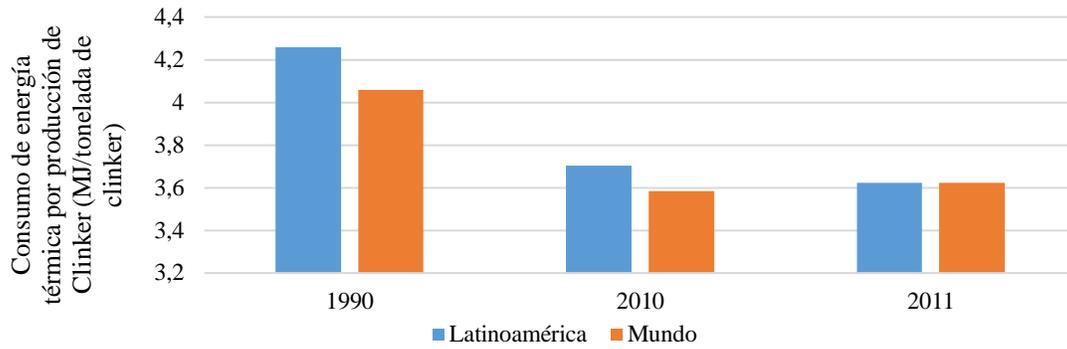


Figura 7. Comparativo del consumo de energía térmica por producción de clinker (MJ/tonelada de clinker) entre Latinoamérica y el mundo. Fuente: [18].

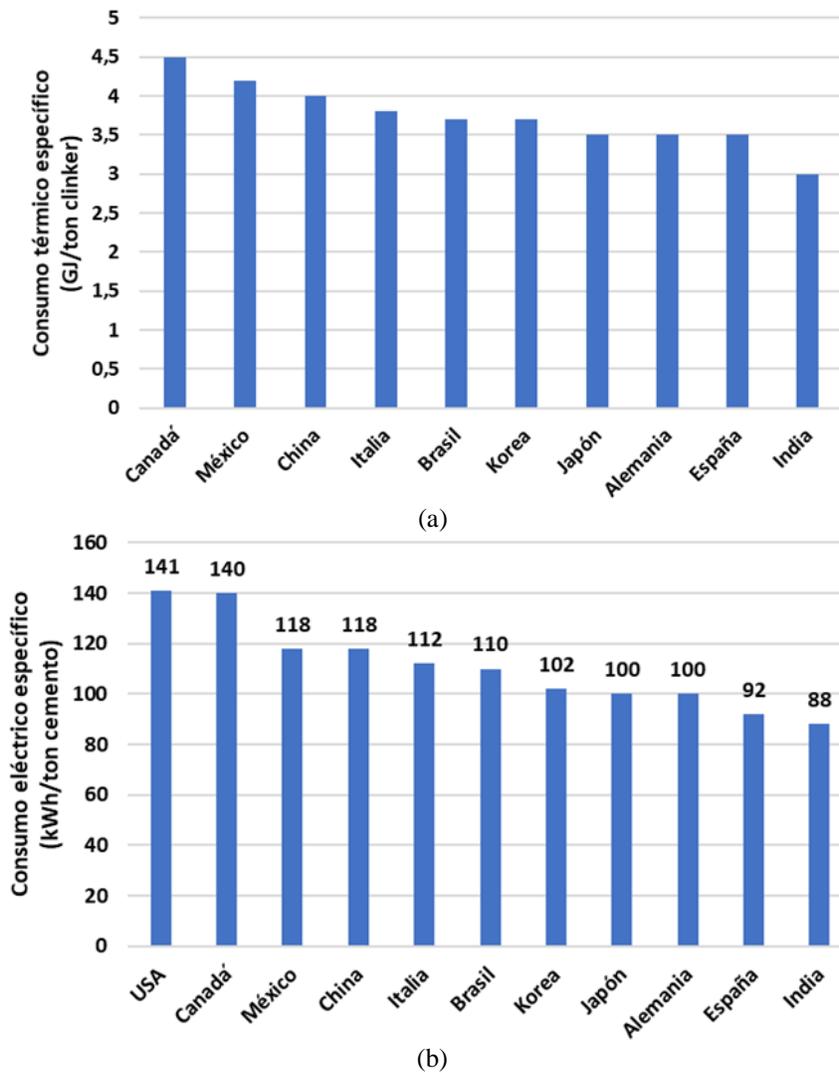


Figura 8. Consumos específicos a) térmico y b) eléctrico de la industria del cemento. Fuente: [2].

El principal recurso energético consumido en la fabricación de cemento es el combustible para horno, y los principales usuarios de electricidad son los molinos (molienda en bruto, molino de acabado, molinos de cemento y molinos de carbón) y los extractores (horno/molino crudo y molino de cemento), cuyos consumos representan más del 80 % del consumo total de la energía eléctrica [2], [9], [34]. A continuación, en la figura 9 y 10, se describen los consumos de recursos energéticos por tipo y por proceso.

El potencial de ahorro depende de la capacidad de producción (escala), factor de carga (mientras más alejado esté del punto de producción nominal, se darán menores rendimientos y mayores consumos específicos), combustibles empleados, etc. [11].

Para Colombia, los factores de carga en la industria del cemento se encuentran cerca del 100 %, por lo que los altos consumos específicos pueden obedecer a altos niveles de obsolescencia de las tecnologías implementadas [17]. En la figura 11 se observa una relación directa entre el nivel de obsolescencia y el consumo específico de energía (GJ/ton clinker). Por ejemplo, cuando el nivel de obsolescencia es 5, el consumo específico es cercano a 5 (GJ/ton clinker), y cuando es más bajo (2), la cantidad de energía suministrada (GJ) para obtener 1 ton clinker es de 3 GJ.

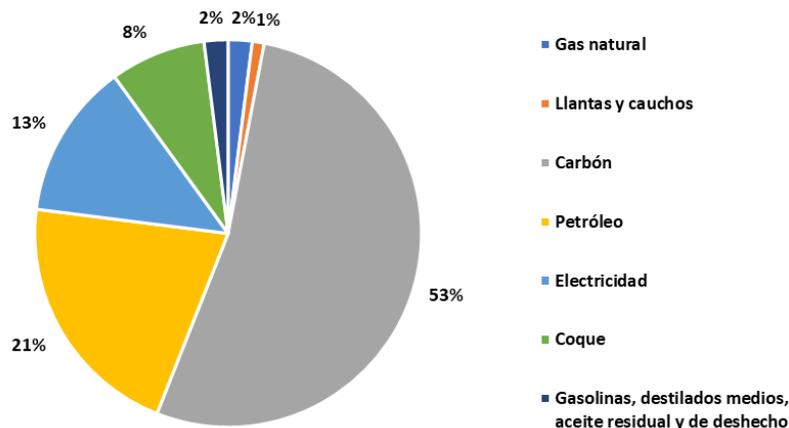


Figura 9. Consumo de energía en la industria del cemento por tipo de recurso usado en los diferentes procesos. Fuente: [2].

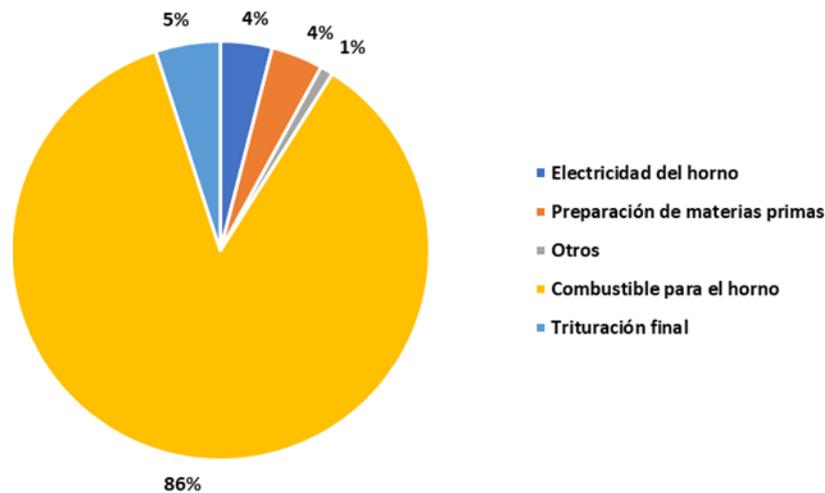


Figura 10. Consumo de energía en la industria del cemento por tipo de usuario final. Fuente: [2].

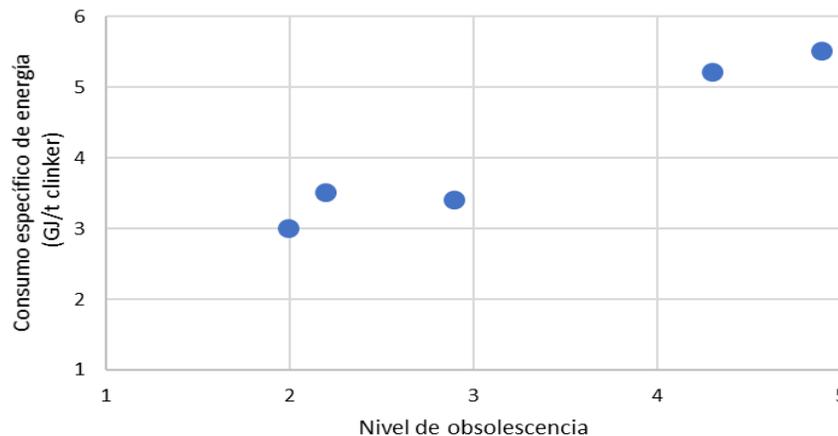


Figura 11. Relación entre el consumo de energía específica (GJ/t clinker) y el nivel de obsolescencia para la industria del cemento de Colombia [17].

Por estas razones, se abordarán y estudiarán medidas y tecnologías que mejoren la eficiencia energética de los equipos de mayor consumo de energía mencionados, que ayuden a hacer un uso racional de los recursos energéticos y, al mismo tiempo, disminuyan las emisiones de GEI y de otros contaminantes, ya que, según las anteriores figuras, en una planta estándar de producción de cemento, los macro consumidores son el horno de calcinación (energía térmica) y los equipos de accionamiento de motores, ventiladores, entre otros (energía eléctrica); y los mayores recursos consumidos son combustibles fósiles, principalmente, carbón y electricidad.

5. Medidas para el ahorro en el consumo de energía y disminución en las emisiones de CO₂ en la industria del cemento

Las tecnologías de ahorro de energía y reducción de emisiones de CO₂ pueden ser divididas en tres tipos, en función de sus características técnicas: tecnología de producción, tecnología para la utilización integral de recursos y energía y tecnología de control de la contaminación [35], [36]. Sin embargo, estas medidas para ser exitosas deben garantizar la calidad y capacidad de producción en las plantas de cemento [32].

Las medidas de reducción de las emisiones de GEI en la industria del cemento están muy relacionadas con el consumo y quema de combustibles fósiles y la liberación de CO₂ durante el proceso [37]. En la figura 12 se muestra la clasificación de estrategias para la reducción de GEI en la industria del cemento.

A continuación, se mencionan algunas de las medidas y recomendaciones plasmadas, las cuales son tomadas de la literatura e implementadas por empresas productoras

de cemento, para reducir el consumo de energía térmica y eléctrica, mejorar la eficiencia energética y disminuir las emisiones de CO₂. Se abordan artículos científicos que estudian las medidas en pro de la gestión integral de la energía en la industria de producción de cemento, cuyos consumos específicos son bajos.

5.1 Horno rotatorio

El quemador rotativo es un horno tipo tubo con revestimiento refractario, diámetro 4,2 m y 59 m de longitud; se encuentra inclinado en un ángulo de 3,5°; su velocidad de rotación es de 1 a 2 rpm y la capacidad promedio de producción de clinker es de 65 ton/h [34]. En la figura 13 se muestra el diagrama de flujo y los balances de materia y energía para un horno rotatorio.

Este equipo es el corazón en la producción de cemento y es el que más energía consume durante el proceso [38], [39]. Por ende, es el macro consumidor de combustibles y es el equipo con mayores pérdidas de energía térmica (ver figura 14).

Una de las medidas que más impacta la eficiencia y el ahorro en el consumo de combustible es el mejoramiento de los refractarios del horno y su aislamiento térmico, lo que se ve reflejado en una disminución en las pérdidas de calor a través de las paredes del equipo y en las emisiones de CO₂ [2], [38], [40], alcanzando ahorros de energía térmica entre 0,12 y 0,63 GJ/t de clinker, una reducción en las emisiones entre 10,3 y 15,5 kgCO₂/ton de clinker [2], [40] e incrementos del 10 al 15 % en la eficiencia del proceso [7].

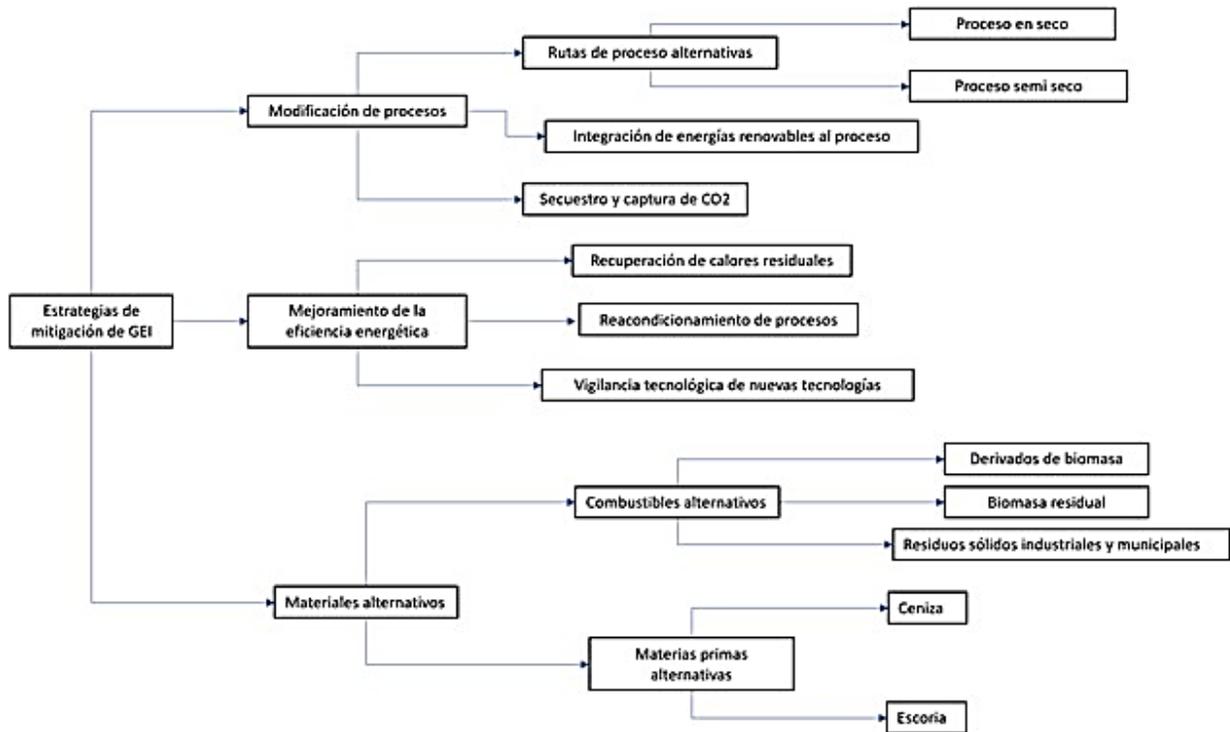


Figura 12. Estrategias para la reducción de GEI en la industria del cemento. Fuente: [37].

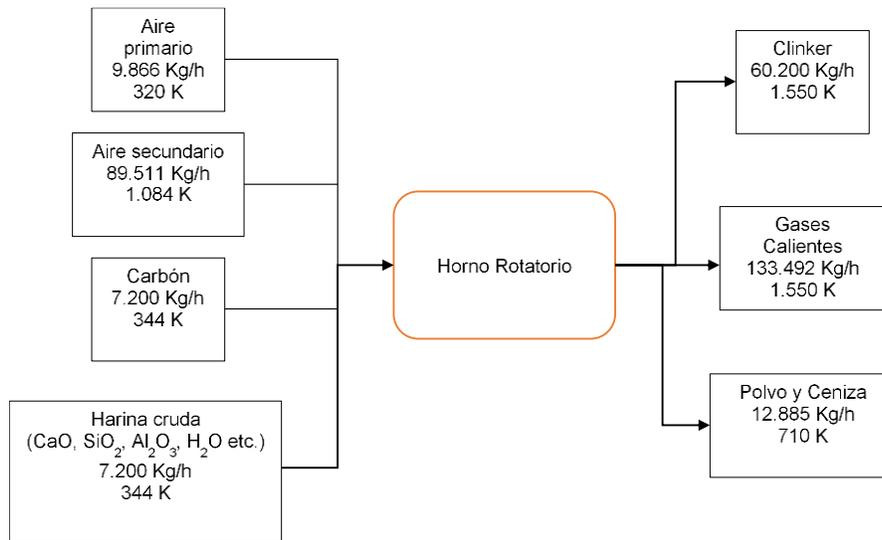


Figura 13. Diagrama de flujo para un horno rotatorio en la producción de clinker. Fuente: [34].

Los hornos de hoy en día tienen longitudes más cortas, sin que se vea afectada su capacidad de producción (ver figura 15) [41]. Además, muchos de ellos queman materiales de desecho industrial y residuos agrícolas. Esto es posible gracias a los altos tiempos de residencia a alta temperatura que presentan estos equipos [42], o al uso de combustibles alternativos, por tener menor impacto al medio ambiente, si son comparados con el carbón [3].

Sin embargo, estos causan problemas en los refractarios utilizados convencionalmente. Además, las áreas de alta temperatura están cubiertas con ladrillos básicos y, por ende, requieren mayor capacidad refractaria, resistencia a los álcalis y al choque térmico y una mejor resistencia a la corrosión [41], [43].

Las pérdidas de calor se presentan entre la coraza del horno y el ambiente, por ende, es un punto crítico para implementar tecnologías de recuperación de calores residuales para el secado de materiales al interior de la planta [44], [43].

Otra medida que reduce las pérdidas calor y aumenta la eficiencia del horno consiste en aumentar el número de etapas del precalentador, esta acción resulta en ahorros

en el consumo de energía térmica de entre 0,08 y 0,111 GJ/ton de clinker y una reducción de emisiones de 8,44 a 9,3 kgCO₂ / ton de clinker [2].

Adicionalmente, este tipo de hornos presentan diferentes configuraciones, consumos específicos y eficiencias [26], [45], tal y como se puede observar en tabla 2.

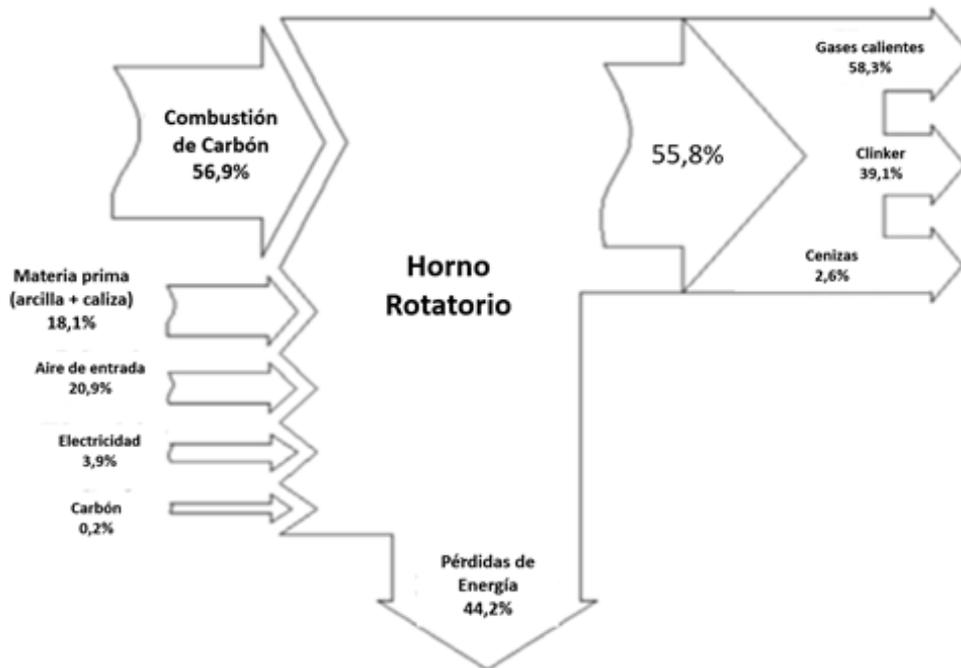


Figura 14. Diagrama Sankey para un horno rotatorio. Fuente: [38].

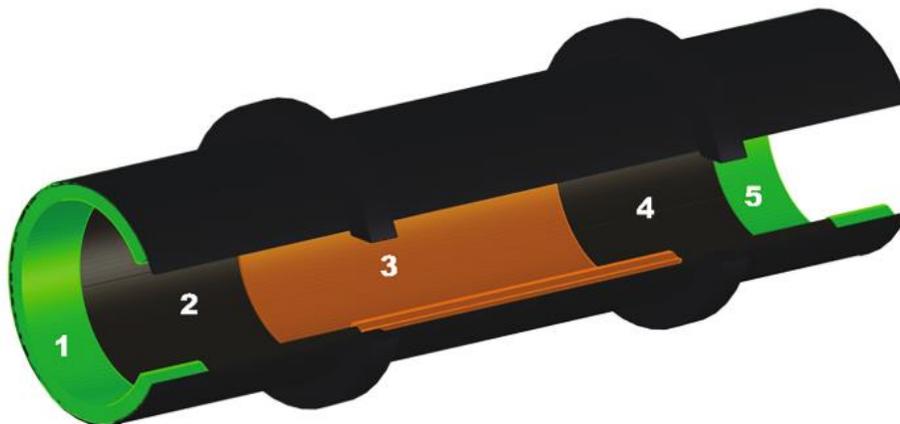


Figura 15. Esquema y representación por zonas de un horno para la producción de cemento. 1) Precalentamiento, 2) calcinación, 3) zona de combustión (transición superior, sinterización y transición inferior), 4) zona de enfriamiento y descarga. Fuente: [43].

Tabla 2. Tipos de hornos utilizados en la producción de cemento

Orientación del horno	Tipo de horno	Consumo específico (GJ/ton)
Horizontal	Horno rotatorio largo	6,0–9,2
	Horno rotatorio largo con precalentador	5,1–7,8
Vertical	Horno regenerativo de flujo paralelo	3,2–4,2
	Horno de eje anular	3,3–4,9
	Horno de eje de alimentación mixta	3,4–4,7
Otros hornos		3,5–7,0

Fuente: elaboración propia.

Según la información plasmada en la tabla 2, se puede afirmar que los hornos con menores consumos específicos son los verticales con un regenerador de flujo paralelo. Además de presentar eficiencias entre el 80 y el 90 % [45], [46], convirtiéndolos en una excelente alternativa a implementar.

A manera de ejemplo, se menciona que cerca del 20 % de la producción actual de cemento de China proviene de plantas de cemento de horno vertical, y el resto proviene de modernas plantas de cemento para hornos rotatorios, incluidos hornos nuevos con precalentamiento y precalcinador (NSP) [47]. En este país asiático se han aumentado los esfuerzos en realizar una reconversión tecnológica de hornos verticales de eje, por hornos rotatorios (NSP), debido a que estos últimos son más

eficientes que su contraparte vertical. En la figura 16 se puede observar la transición tecnológica en hornos de producción de cemento en China.

Adicionalmente, en la figura 17 se ilustra la producción de cemento, entre el 2006 y el 2012, para Etiopía.

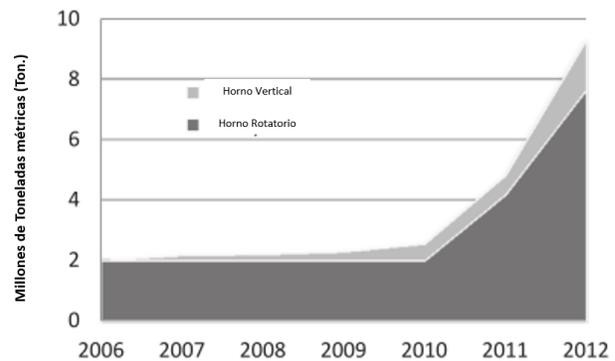


Figura 17. Producción de cemento en Etiopía entre 2006 y 2012 para hornos rotativos (gris oscuro) y hornos verticales (gris claro). Fuente: [8].

El análisis de las Figuras 16 y 17 permite decir que los países con mayores producciones de cemento están implementando medidas que les están dando la posibilidad de desarrollar una industria productora de cemento sostenible, rentable, eficiente y competitiva. En cambio, en países en vías de desarrollo y con producciones de cemento bajas estos cambios en pro de la eficiencia energética y la mitigación en la emisión de contaminantes y GEI no se están presentando tan rápido, como si lo hacen países desarrollados, por ejemplo, China.

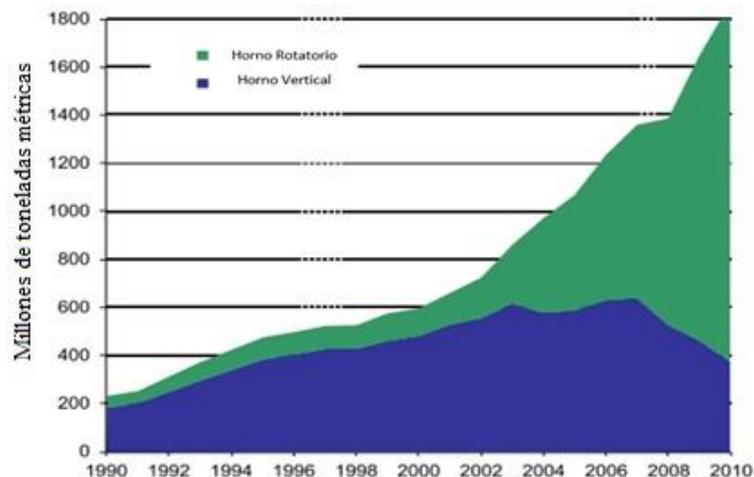


Figura 16. Producción de cemento en China entre 1990 y 2010 para hornos rotativos (verde) y hornos verticales (azul). Fuente: [47] industria del cemento de Colombia [17].

Los avances alcanzados por China en el mejoramiento de su industria del cemento se deben a las políticas energéticas de reconversión tecnológica, implementadas por el Gobierno, buscando aumentar sus eficiencias y disminuir las emisiones de CO₂, para alcanzar los compromisos acordados en la cumbre climática efectuada en París [16].

5.2 Recuperación de calores residuales

Un sistema de recuperación de calor aumenta la eficiencia de una planta de cemento y contribuye a la reducción en las emisiones de GEI. Además, contribuye en la disminución de la temperatura de los gases de escape y de la cantidad de calor residual emitido al medio ambiente [33].

Se ha demostrado que la implementación de este tipo de sistemas posibilita un ahorro de energía térmica de 0,25-0,345 GJ/ton clinker, un ahorro de energía eléctrica de 20 a 35 kWh/ton clinker y una reducción en las emisiones de gases efecto invernadero, entre 4,6 y 31,66 kgCO₂/ton clinker.

Estudios han demostrado que cerca del 35 % de la energía que se le suministra al proceso de producción se escapa en los gases de combustión, en el proceso de enfriamiento y a través de la superficie del horno rotatorio [38], [48]. Por esto, una de las formas más efectivas de ahorrar energía y de recuperar calores residuales consiste en el precalentamiento de la materia prima antes del proceso de producción de clinker, recirculando los gases de escape del horno hacia el equipo que precalienta la piedra [3], [27]. Se sugirió la aplicación de generador de vapor de recuperación de calor residual y cáscara del horno secundario. Ellos mostraron que el ahorro energético y de energía térmica es de 42,88 MWh y 5,30 MW, respectivamente.

Por otro lado, el ciclo Rankine orgánico se acopla a ambientes industriales susceptibles de recuperar calores residuales, y a través de un fluido de trabajo con bajas temperatura crítica se puede generar electricidad [21], [49]; por lo general, es un agente refrigerante como el R134a [21]. Adicionalmente, el uso de ORC conduce a una mayor eficiencia del sistema en comparación con el Rankine de agua/vapor, si se aprovecha el calor residual del horno, ya que la temperatura superficial oscila entre los 450-620 °C.

5.3 Combustibles alternativos

Los combustibles fósiles son los más utilizados para la obtención de la energía térmica necesaria para la producción de cemento, debido a su disponibilidad y

bajos precios [42], [48]. Para alcanzar un mínimo teórico de 1,76 GJ de energía y producir 1 tonelada métrica (t) de clinker de cemento portland, generalmente, se utiliza carbón o coque de petróleo [6], [23], [50].

Esta industria está migrando hacia el uso de combustibles alternativos, ya que los recursos fósiles presentan una alta volatilidad en sus precios de mercado y son no renovables [12]. A nivel mundial es utilizado en la manufactura de cemento un 7 % de combustibles alternativos y un 3 % de biomasa [51].

Adicionalmente, las emisiones de contaminantes y gases efecto invernadero directas del horno, por el uso de combustibles fósiles, son el principal contribuyente a cinco categorías de impacto ambiental negativo: calentamiento global, eco toxicidad terrestre, oxidación fotoquímica, acidificación y eutroficación [42], [52].

Alrededor del mundo se logra un uso mayor al 30 % de combustibles alternativos del total de los combustibles utilizados por la industria del cemento; en la India este porcentaje es del 0,6 %, en muchas plantas de US estos recursos renovables satisfacen entre un 20 y un 70 % de la energía térmica requerida, en Holanda este indicador es del 80 %, el promedio de la comunidad europea está entre un 22 y un 62 % y para Japón y Alemania el valor estuvo en 16,4 % para el 2014 y en 64,6 % en 2015 [53].

Los combustibles alternativos utilizados en la fabricación de cemento incluyen principalmente: llantas usadas, líquidos combustibles secundarios (tintas recicladas, solventes industriales, aceites minerales y vegetales usados), biomasas residuales, entre otros [14], [48], [51], [54]. También, se incluyen los residuos industriales y domésticos utilizados como combustibles alternativos (CA); pueden clasificarse en dos grupos: CA líquidos, como aceites usados, disolventes, grasa animal y lodos de depuradora; y los CA sólidos, incluido el coque de petróleo, neumáticos viejos, harinas de animales y huesos, lodos de depuradora seca, madera de desecho y desechos de otras industrias como pulpa, papel, cartón, plásticos, envases y textiles [55].

Por ejemplo, una sustitución térmica del 30 % del coque por un lodo seco de las plantas de tratamiento de aguas residuales conduce a niveles de producción de clinker entre un 8 y un 15 % más bajos, dependiendo de las condiciones de operación. Sin embargo, esta acción puede reducir entre un 60-70 % el consumo de combustibles fósiles en el horno de producción de cemento [7], [14]. También se evidenció la utilización de residuos de comida como combustible, pero esta alternativa es un poco compleja de implementar debido a los altos contenidos de humedad en este recurso que

deben ser removidos, por lo que se prefiere derivar este tipo de recursos a revalorización mediante su uso como materia prima en la producción de biogás o biodiesel [56]. Cualquiera sea el tratamiento de revalorización de este tipo de residuos biodegradables, diferentes a una disposición final en relleno sanitario, evita la emisión de gases efecto invernadero (CH_4) por la descomposición de estos residuos al interior del relleno [56], [57].

En la tabla 3 se muestran varios residuos industriales derivados de recursos del petróleo y de biomasa o de naturaleza orgánica, que pueden ser reciclados y aprovechados como combustibles para el reemplazo del carbón y otros recursos energéticos no renovables.

Si se logra una sustitución del coque de petróleo o combustibles fósiles convencionales por un combustible residual de tipo biogénico —por ejemplo, desechos de procesamiento de madera, desechos de papel o lodo biológico—, se generarían ingresos por concepto de tarifas de vertido (tasas retributivas) y créditos de CO_2 [14].

Es importante aclarar que los principales criterios de selección del combustible alternativo a usar son: el mayor valor de poder calorífico (entrada de energía), la composición del residuo de ceniza, la toxicidad de los gases generados, el contenido de humedad y de sus composiciones elementales [61].

Otros criterios propuestos son los establecidos por WBC para el desarrollo sostenible [53]. A continuación, son mencionados algunos de estos.

- El material no debe tener altos contenidos de álcali, azufre y/o cloruro.
- El material de desecho utilizado como combustible alternativo debe tener el suficiente valor calorífico.
- Contenidos mínimos de agua.
- Ausencia de metales volátiles como plomo, talio, mercurio, selenio, cadmio, etc.
- La ausencia de algunos materiales que afecte la calidad del clinker y el cemento (por ejemplo; fosfato, cromo, cloruro, álcali).
- Ausencia de materiales que afecten la salud y seguridad de los empleados.

Por otro lado, se debe tener en cuenta que la utilización de combustibles alternativos, la valorización de residuos y subproductos urbanos/industriales debe afrontar preocupaciones sobre el aumento de metales pesados en las emisiones de chimeneas de hormigón, incluidos metales, la presencia de halógenos en los circuitos de

gases de combustión y otro tipo de contaminantes que pueden afectar el suelo y las aguas [50].

Adicionalmente, los residuos con potencial energético y los aditivos (aglutinantes) en hornos de cemento pueden generar y desarrollar durante su combustión especies volátiles, que puede afectar la atmósfera interna, los fenómenos de transferencia de masa y el avance de la reacción química al modificarse la presión parcial de gases como CO_2 , O_2 y SO_2 [63].

5.4 Energías renovables

Dado que de las 0,863 ton de CO_2 por ton de cemento producido, cerca del 60 % provienen del proceso de descomposición térmica de la caliza y el 40 % restante corresponde a las emisiones ocasionadas por la quema de un combustible y del consumo de electricidad para alcanzar las altas temperaturas requeridas para llevar a cabo estos procesos [23], [25], [64], se hace relevante estudiar tecnologías que suministren esta energía y sean cero emisiones [23]. A continuación, en la tabla 4, se mencionan algunas de ellas.

6. Barreras y perspectivas futuras

La transición energética en industrias intensivas en el uso de energía y combustibles fósiles, como lo es la industria del cemento, requerirá un enfoque de innovación holístico y de la inclusión de los sectores del sistema energético, en función de las necesidades de cada instalación, proceso y/o planta en la implementación de energías renovables y programas de eficiencia energética [69]. Si bien, un aumento en la inversión en I + D en este campo para tecnologías bajas en carbono beneficia la transición energética, se puede prestar más atención al seguimiento y verificación que esas inversiones tienen en el impacto deseado y que los presupuestos y prioridades de I + D están impulsados por el impacto, mejorando así la competitividad, sostenibilidad y eficiencia en la cadena de producción del cemento, ya que el consumo de combustibles y energía en la industria del cemento representa entre un 30-40 % del total de los costos de producción [55].

Sin embargo, las dificultades para implementar medidas de eficiencia energética, la mitigación en la emisión de contaminantes, reconversión tecnológica en energías renovables o equipos de bajo consumo o el uso de nuevos procesos en la planta pueden ser clasificadas en tres tipos de barreras: económicas, comportamentales o culturales y organizacionales [17]. Además, se pueden presentar situaciones en las que las medidas estudiadas no son puestas en marcha, debido al desconocimiento de los beneficios por parte de los tomadores de decisiones [24].

Tabla 3. Materiales alternativos como combustibles en la producción de cemento

Material	Energía térmica	Emisiones	Observaciones	Ref.
Revestimiento de carbón gastado (SCL)	Requirió 2,42 veces la cantidad de carbón	Produjo 79 % más de dióxido de carbono que el carbón puro.	El uso de SCL no proporciona una energía térmica significativa; más bien, reduce el flujo del material de alimentación y es una fuente de flúor. La desventaja de usar SCL es un aumento en las emisiones de dióxido de carbono. El factor limitante para el uso de SCL es el contenido de óxido de sodio o álcali.	[42]
Lubricante industrial	Se requieren 2 kg menos de material que el carbón para generar la energía térmica demandada	Las emisiones de CO ₂ aumentaron 13 % para el caso en que el carbón fue completamente sustituido por lubricantes industriales usados.	La implementación de lubricantes usados como combustible es la alternativa más sencilla, debido a la naturaleza líquida del material; el equipo de almacenamiento y manejo requiere poco espacio y se puede incorporar fácilmente en una planta existente.	[42]
Llantas o neumáticos usados	Se requieren 1,2 kg menos de material que el carbón para generar la energía térmica demandada	Los neumáticos usados produjeron un 9 % menos de dióxido de carbono que el carbón puro.	La incineración de neumáticos usados es una práctica sostenible, ya que las aplicaciones de reciclaje actualmente no pueden consumir la cantidad de material generado. Además, se encontró que la combustión de neumáticos en el horno era un proceso limpio debido a la temperatura muy alta y a los largos tiempos de residencia.	[42], [29], [58]
Plásticos (PET y PVC)	Se requiere un 50,28 % más de material, si se compara con el carbón	Las emisiones son un 20,89 % inferiores que el equivalente para el uso de carbón.		[59]
Fibra de papel	Se requiere un 46,92 % más de material, si se compara con el carbón	Las emisiones son un 32,68 % inferiores que el equivalente para el uso de carbón.		[59]
Lodos de plantas de tratamiento de agua residuales (PTAR)	6,2-8,2 MJ/kg		Los hornos que utilicen este material trabajan a temperaturas tan altas, que se logra la eliminación de organismos patógenos y otros orgánicos peligrosos.	[58], [60]
Lodos de petróleo	8,53-20,25 MJ/kg El uso de este material en un 14 % w/w en la mezcla cruda logra que 1,6 ton de esta mezcla sea igual 0,12 ton de carbón	La adición de lodos de aceite aumentó la concentración de compuestos orgánicos volátiles (COV) durante la desgasificación en más del 90 %. Sin embargo, la cantidad de COV disminuyó a medida que aumentó la temperatura de calcinación, lo que sugiere que el fango debe procesarse a altas temperaturas (por encima de 1450 °C).		[29]
Combustible derivado de rechazo (residuos sólidos municipales, residuos de biomasa, lodos de PTAR, residuos industriales peligrosos, entre otros)		En el 2006 varios países europeos con estos combustibles de rechazo cubrieron más del 70 % de energía térmica requerida para la fabricación de cemento.		[61]
Mezcla de cascarilla de arroz con combustible derivado de rechazo	2530-5250 Kcal/kg	La adición de la mezcla disminuyó la concentración de emisiones de gas NO _x , aunque la cantidad de gas SO _x no se vio afectada a la temperatura de calcinación probada.	Produce inmensas cantidades de rendimiento de volátiles (cenizas > 96 % en peso) y poco carbono fijo. El consumo de electricidad decreció un 13 % con la utilización de mezclas de este combustible al 5 %.	[55]
Residuos de alimentos	668-4919 Kcal/kg		Una sustitución del 20 % en la sustitución de coque disminuyó en un 2 % la productividad en las plantas. Una mezcla de estos residuos (80 %) y papel (20 %) mostró un incremento en la productividad cercana al 2 % en las plantas	[62]

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4. Ejemplos de la aplicación de energías renovables en la producción de cemento

Energía renovable	Características	Esquema de funcionamiento	Referencia
<p>Energía fotovoltaica, solar térmica y electroquímica (STEP)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • La piedra caliza de cemento se somete a una electrólisis de baja energía para producir cal, O₂ y carbonato reducido sin emisión de dióxido de carbono. • La electrólisis es un proceso endotérmico y cuando la energía requerida es solar, el proceso es libre de dióxido de carbono originado por la combustión de recursos fósiles. 		<p>[65], [66]</p>
<p>Sistema híbrido fotovoltaico y eólico</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Es una solución tendencia para mitigar las emisiones de CO₂ mediante el establecimiento de una red renovable que pueda satisfacer una fracción significativa de la demanda exigida por la industria. • En este tipo de instalaciones son más eficientes aquellas en las que se cuenta con un banco de baterías para el almacenamiento de la energía en las horas de mayor irradiación solar y de mayor velocidad y disponibilidad de vientos. 		<p>[67]</p>
<p>Calcinador solar</p>	<ul style="list-style-type: none"> • La implementación de la energía solar térmica en la planta de cemento tendría lugar a través de un reactor solar en el que el calor se suministra a través de energía solar concentrada. • Si el 50 % de las plantas adopta la tecnología de calcinación solar para 2050, las reducciones de emisiones sumarían el 7 % (en el caso optimista) y el 2 % en el caso pesimista. • Una forma de contrarrestar las emisiones de GEI significativamente sería implementar un secuestro controlado de CO₂ en el calcinador solar. Esto daría como resultado reducciones de emisiones del 8 al 28 %. 		<p>[68]</p>

Fuente: elaboración propia.

La realización de actividades de investigación, desarrollo e innovación en esta industria se encuentra relacionada con el costo de la inversión y el riesgo de comprometer capital con tecnologías no probadas [5], [48], [70]. En consecuencia, cualquier cambio debe ir acompañado de la optimización del proceso en pro de alcanzar reducción en los costos operacionales y, de esta forma, poder compensar los gastos de la medida implementada [48], [70].

Por ejemplo, la tecnología de combustión con oxígeno puro (OXY-Combustión) se encuentra actualmente en pequeña escala, y las tecnologías de secuestro, captura y almacenamiento de CO₂ estarán disponibles comercialmente para el 2020 [71].

7. Conclusiones

La implementación de las alternativas aquí discutidas mejoraría ostensiblemente la eficiencia y productividad de una planta de producción de cemento. Sin embargo, muchas de ellas no son implementadas, en su mayoría, debido a barreras de tipo económico y organizacional; y dada la necesidad de capital para la compra de nueva tecnología y para poner en marcha las medidas en pro de la eficiencia de la planta, de personal capacitado y con la dedicación adecuada, de tal manera que el desarrollo de estas se haga de forma profesional, basado en estándares internacionales y elementos de mejora continua.

Finalmente, se debe considerar el análisis y evaluación de las características finales del cemento producido, posterior a la implementación de una o varias de estas medidas, ya que cualquier variación en un parámetro de operación del proceso de producción puede afectar la calidad del cemento.

Referencias

[1] S. Licht *et al.*, “STEP cement: Solar Thermal Electrochemical Production of CaO without CO₂ emission,” *Chem. Commun.*, 2012, doi: 10.1039/c2cc31341c

[2] N. A. Madlool, R. Saidur, N. A. Rahim, M. Kamalisarvestani, “An overview of energy savings measures for cement industries,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 19, pp. 18–29, 2013, doi: 10.1016/j.rser.2012.10.046

[3] N. A. Madlool, R. Saidur, M. S. Hossain, N. A. Rahim, “A critical review on energy use and savings in the cement industries,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, no. 4, pp. 2042–2060, 2011, doi: 10.1016/j.rser.2011.01.005

[4] J. Liu, S. Zhang, F. Wagner, “Exploring the driving forces of energy consumption and environmental pollution in China ’ s cement industry at the provincial level,” *J. Clean. Prod.*, vol. 184, pp. 274–285, 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.02.277

[5] D. L. Summerbell, C. Y. Barlow, J. M. Cullen, “Potential reduction of carbon emissions by performance improvement : A cement industry case study,” *J. Clean. Prod.*, vol. 135, pp. 1327–1339, 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.06.155

[6] L. Zhang, W. E. Mabee, “Comparative study on the life-cycle greenhouse gas emissions of the utilization of potential low carbon fuels for the cement industry,” *J. Clean. Prod.*, vol. 122, pp. 102–112, 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.02.019

[7] S. A. Ishak, H. Hashim, T. S. Ting, “Eco innovation strategies for promoting cleaner cement manufacturing,” *J. Clean. Prod.*, vol. 136, pp. 133–149, 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.06.022

[8] G. Tesema, E. Worrell, “Energy efficiency improvement potentials for the cement industry in Ethiopia,” *Energy*, vol. 93, pp. 2042–2052, 2015, doi: 10.1016/j.energy.2015.10.057

[9] K. H. Karstensen, C. J. Engelsens, S. Ng, P. K. Saha, M. N. Malmedal, “Cement Manufacturing and Air Quality,” vol. 73, pp. 683–705, 2016

[10] S. Berriel, Y. Díaz, H. J.F.M, H. G, “Assessment of Sustainability of Low Carbon Cement in Cuba . Cement Pilot Production and Prospective Case,” *Calcined Clays Sustain. Concr.*, vol. RILEM Book, no. 10, pp. 189–194, 2015, doi: 10.1007/978-94-017-9939-3

[11] UPME, “Ahorro de energía en la industria del cemento,” 2013. [Online]. Available: http://www.si3ea.gov.co/Portals/0/Gie/Procesos/cement_o.pdf.

[12] J. C. Brunke, M. Blesl, “Energy conservation measures for the German cement industry and their ability to compensate for rising energy-related production costs,” *J. Clean. Prod.*, vol. 82, pp. 94–111, 2014, doi: 10.1016/j.jclepro.2014.06.074

[13] D. Song, “Extended Exergy Accounting For Energy Consumption and CO₂ Emissions of Cement Industry—A Basic Framework,” *Energy Procedia*, vol. 88, pp. 305–308, 2016, doi: 10.1016/j.egypro.2016.06.145

- [14] C. A. Tsiliyannis, "Cement manufacturing using alternative fuels: Enhanced productivity and environmental compliance via oxygen enrichment," *Energy*, vol. 113, pp. 1202–1218, 2016, doi: 10.1016/j.energy.2016.07.082
- [15] Scopus, "Scopus - Analyze search results." 2020.
- [16] S. Zhang, H. Ren, W. Zhou, Y. Yu, T. Ma, C. Chen, "Assessing air pollution abatement co-benefits of energy efficiency improvement in cement industry: A city level analysis," *J. Clean. Prod.*, 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.02.293
- [17] B. Herrera *et al.*, "Use of thermal energy and analysis of barriers to the implementation of thermal efficiency measures in cement production: Exploratory study in Colombia," *Energy*, vol. 140, pp. 1047–1058, 2017.
- [18] FICEM, "Informe Estadístico 2013," Bogotá D.C, 2013. [Online]. Available: http://www.ficem.org/estadisticas/informe_estadistico_2013.pdf.
- [19] C. Gacía Arbeláez, G. Vallejo, M. Lou Higgins, And E. M. Escobar, *El Acuerdo De París Así Actuará Colombia Frente Al Cambio Climático*. 2016.
- [20] W. Bulege, "COP 21: Acuerdo contra el cambio climático en Paris," *Apunt. cienc. soc. 2015*., vol. 05, no. 02, pp. 186–187, 2015, doi: 10.18259/acs.2015027
- [21] J. J. Fierro, A. Escudero-Atehortua, C. Nieto-Londoño, M. Giraldo, H. Jouhara, L. C. Wrobel, "Evaluation of waste heat recovery technologies for the cement industry," *Int. J. Thermofluids*, vol. 7–8, 2020, doi: 10.1016/j.ijft.2020.100040
- [22] D. García, D. Garrai, "Life cycle assessment of the Spanish cement industry: implementation of environmental-friendly solutions," *Clean Techn. Env. Policy*, vol. 17, pp. 59–73, 2015, doi: 10.1007/s10098-014-0757-0
- [23] S.-Y. Huh, H. Lee, J. Shin, D. Lee, J. Jang, "Inter-fuel substitution path analysis of the Korea cement industry," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 82, pp. 4091–4099, 2018, doi: 10.1016/j.rser.2017.10.065
- [24] S. R. Hossain, I. Ahmed, F. S. Azad, A. S. M. Monjurul Hasan, "Empirical investigation of energy management practices in cement industries of Bangladesh," *Energy*, vol. 212, p. 118741, 2020, doi: 10.1016/j.energy.2020.118741
- [25] C.-Y. Zhang, R. Han, B. Yu, Y.-M. Wei, "Accounting process-related CO₂ emissions from global cement production under Shared Socioeconomic Pathways," *J. Clean. Prod.*, vol. 184, pp. 451–465, 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.02.284
- [26] M. J. S. Zuberi, M. K. Patel, "Bottom-up analysis of energy efficiency improvement and CO₂ emission reduction potentials in the Swiss cement industry," *J. Clean. Prod.*, vol. 142, pp. 4294–4309, 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.11.178
- [27] B. Afkhami, B. Akbarian, N. Beheshti A., A. H. Kakaee, B. Shabani, "Energy consumption assessment in a cement production plant," *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 10, pp. 84–89, 2015, doi: 10.1016/j.seta.2015.03.003
- [28] S. Fellaou, T. Bounahmidi, "Analyzing thermodynamic improvement potential of a selected cement manufacturing process: Advanced exergy analysis," *Energy*, vol. 154, pp. 190–200, 2018, doi: 10.1016/j.energy.2018.04.121
- [29] M. Huang *et al.*, "Evaluation of oil sludge as an alternative fuel in the production of Portland cement clinker," vol. 152, pp. 226–231, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.06.157
- [30] S. A. Miller, F. C. Moore, "Climate and health damages from global concrete production," *Nat. Clim. Chang.*, vol. 10, no. 5, pp. 439–443, 2020, doi: 10.1038/s41558-020-0733-0
- [31] F. S. Hashem, T. A. Razeq, H. A. Mashout, "Rubber and plastic wastes as alternative refused fuel in cement industry," *Constr. Build. Mater.*, vol. 212, pp. 275–282, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.316
- [32] A. Mokhtar, M. Nasooti, "A decision support tool for cement industry to select energy efficiency measures," *Energy Strateg. Rev.*, vol. 28, no. November 2016, p. 100458, 2020, doi: 10.1016/j.esr.2020.100458

- [33] S. Karellas, A. Leontaritis, G. Panousis, E. Bellos, E. Kakaras, “Energetic and exergetic analysis of waste heat recovery systems in the cement industry,” *Energy*, vol. 58, pp. 147–156, 2013, doi: 10.1016/j.energy.2013.03.097
- [34] A. Atmaca, R. Yumrutaş, “Analysis of the parameters affecting energy consumption of a rotary kiln in cement industry,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 66, no. 1–2, pp. 435–444, 2014, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2014.02.038
- [35] Z. Wen, M. Chen, F. Meng, “Evaluation of energy saving potential in China’s cement industry using the Asian-Pacific Integrated Model and the technology promotion policy analysis,” *Energy Policy*, vol. 77, pp. 227–237, 2015, doi: 10.1016/j.enpol.2014.11.030
- [36] S. Fellaou, T. Bounahmidi, “Evaluation of energy efficiency opportunities of a typical Moroccan cement plant : Part I . Energy analysis,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 115, pp. 1161–1172, 2017, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2017.01.010
- [37] A. Talaei, D. Pier, A. V. Iyer, M. Ahiduzzaman, A. Kumar, “Assessment of long-term energy efficiency improvement and greenhouse gas emissions mitigation options for the cement industry,” *Energy*, vol. 170, pp. 1051–1066, 2019, doi: 10.1016/j.energy.2018.12.088
- [38] A. Atmaca, R. Yumrutaş, “Analysis of the parameters affecting energy consumption of a rotary kiln in cement industry,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 66, 2014, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2014.02.038
- [39] Y.-H. Huang, Y.-L. Chang, T. Fleiter, “A critical analysis of energy efficiency improvement potentials in Taiwan’s cement industry,” *Energy Policy*, vol. 96, pp. 14–26, 2016, doi: 10.1016/j.enpol.2016.05.025
- [40] W. R. Morrow III, A. Hasanbeigi, J. Sathaye, T. Xu, “Assessment of energy efficiency improvement and CO₂ emission reduction potentials in India’s cement and iron & steel industries,” *J. Clean. Prod.*, vol. 65, pp. 131–141, 2014, doi: 10.1016/j.jclepro.2013.07.022
- [41] Höganäs BjuF Refractories, “Refractories for the cement industry Kiln Höganäs BjuF Refractories,” BjuF, 2016. Accessed: Dec. 09, 2016. [Online]. Available: http://cement.hoganasbjuf.com/en/Knowledge/~media/Files/HoganasBjuFCement/Downloads/HEA_handbook_kiln_magnus_v1_screen.pdf.
- [42] K. T. Kaddatz, M. G. Rasul, A. Rahman, “Alternative fuels for use in cement kilns: Process impact modelling,” *Procedia Eng.*, vol. 56, pp. 413–420, 2013, doi: 10.1016/j.proeng.2013.03.141
- [43] A. Mittal, D. Rakshit, “Energy audit and waste heat recovery from kiln hot shell surface of a cement plant,” *Therm. Sci. Eng. Prog.*, vol. 19, no. January, p. 100599, 2020, doi: 10.1016/j.tsep.2020.100599
- [44] A. Mittal, D. Rakshit, “Utilization of cement rotary kiln waste heat for calcination of phosphogypsum,” *Therm. Sci. Eng. Prog.*, vol. 20, no. September, p. 100729, 2020, doi: 10.1016/j.tsep.2020.100729
- [45] V. Alcántara *et al.*, “A study case of energy efficiency , energy profile , and technological gap of combustion systems in the Colombian lime industry,” vol. 128, pp. 393–401, 2018.
- [46] E. Commission, “Reference Document on Best Available Techniques in Cement , Lime and Magnesium Oxide Manufacturing Industries,” no. May, 2010.
- [47] A. Hasanbeigi, W. Morrow, E. Masanet, J. Sathaye, and T. Xu, “Energy efficiency improvement and CO₂ emission reduction opportunities in the cement industry in China,” *Energy Policy*, vol. 57, pp. 287–297, 2013, doi: 10.1016/j.enpol.2013.01.053
- [48] E. Benhelal, G. Zahedi, E. Shamsaei, A. Bahadori, “Global strategies and potentials to curb CO₂ emissions in cement industry,” *J. Clean. Prod.*, vol. 51, pp. 142–161, 2013, doi: 10.1016/j.jclepro.2012.10.049
- [49] R. Loni, G. Najafi, E. Bellos, F. Rajaei, Z. Said, and M. Mazlan, “A review of industrial waste heat recovery system for power generation with Organic Rankine Cycle: Recent challenges and future outlook,” *J. Clean. Prod.*, vol. 287, 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.125070
- [50] P. Strother, *Manufacture of Portland Cement*, 5th ed. Elsevier Ltd., 2019.
- [51] T. Harrison, M. R. Jones, and D. Lawrence, *The Production of Low Energy Cements*, 5th ed. Elsevier Ltd., 2019.
- [52] M. Georgiopoulou, G. Lyberatos, “Life cycle assessment of the use of alternative fuels in cement kilns : A case study,” *J. Environ. Manage.*, pp. 1–11, 2018, doi: 10.1016/j.jenvman.2017.07.017

- [53] P. V. Nidheesh and M. S. Kumar, *An overview of environmental sustainability in cement and steel production*. Elsevier B.V., 2019.
- [54] H. Mikulčić, J. J. Klemeš, M. Vujanović, K. Urbanec, N. Duić, “Reducing greenhouse gasses emissions by fostering the deployment of alternative raw materials and energy sources in the cleaner cement manufacturing process,” *J. Clean. Prod.*, vol. 136, pp. 119–132, 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.04.145
- [55] A. L. H. R. El-Salamony, H. M. Mahmoud, N. Shehata, “Enhancing the efficiency of a cement plant kiln using modified alternative fuel,” *Environ. Nanotechnology, Monit. Manag.*, vol. 14, no. December 2019, 2020, doi: 10.1016/j.enmm.2020.100310
- [56] A. Tsiligiannis, C. Tsiliyannis, “Renewable energy in cement manufacturing: A quantitative assessment of energy and environmental efficiency of food residue biofuels,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 107, no. February, pp. 568–586, 2019, doi: 10.1016/j.rser.2019.03.009
- [57] C. E. Aristizábal-alzate, J. L. González-manosalva, “Effectiveness analysis of the ITM environmental programs: saving and efficient use of electric energy and water, and comprehensive solid waste management. A case study,” *DYNA*, vol. 85, no. 207, pp. 36–43, 2018, doi: <http://doi.org/10.15446/dyna.v85n207.69309>
- [58] C. Horsley, M. H. Emmert, A. Sakulich, “Influence of alternative fuels on trace element content of ordinary portland cement,” *Fuel*, vol. 184, pp. 481–489, 2016, doi: 10.1016/j.fuel.2016.07.038
- [59] A. C. (Thanos,) Bourtsalas, J. Zhang, M. J. Castaldi, N. J. Themelis, “Use of non-recycled plastics and paper as alternative fuel in cement production,” *J. Clean. Prod.*, vol. 181, pp. 8–16, 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.01.214
- [60] F. Rezaee, S. Danesh, M. Tavakkolizadeh, “Investigating chemical, physical and mechanical properties of eco-cement produced using dry sewage sludge and traditional raw materials,” *J. Clean. Prod.*, vol. 214, pp. 749–757, 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.12.153
- [61] F. S. Hashem, T. A. Razek, H. A. Mashout, “Rubber and plastic wastes as alternative refused fuel in cement industry,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 212, pp. 275–282, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.316
- [62] A. Tsiligiannis, C. Tsiliyannis, “Renewable energy in cement manufacturing: A quantitative assessment of energy and environmental efficiency of food residue biofuels,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 107, no. March, pp. 568–586, 2019, doi: 10.1016/j.rser.2019.03.009
- [63] T. Hanein, F. P. Glasser, M. N. Bannerman, “Thermodynamic data for cement clinkering,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 132, no. March, p. 106043, 2020, doi: 10.1016/j.cemconres.2020.106043
- [64] D. Fernández-González, J. Prazuch, I. Ruiz-Bustinza, C. González-Gasca, J. Piñuela-Noval, L. F. Verdeja, “Solar synthesis of calcium aluminates,” *Sol. Energy*, vol. 171, pp. 658–666, Sep. 2018, doi: 10.1016/j.solener.2018.07.012
- [65] S. Licht, B. Cui, B. Wang, “STEP carbon capture - The barium advantage,” *J. CO2 Util.*, 2013, doi: 10.1016/j.jcou.2013.03.006
- [66] B. Wang, D. Gu, J. Dong, D. Yuan, L. Zhu, “STEP chemistry: A fundamental insight into solar thermal electrochemical process,” *Energy Convers. Manag.*, 2017, doi: 10.1016/j.enconman.2017.09.045
- [67] L. Al-Ghussain, H. Ahmed, F. Haneef, “Optimization of hybrid PV-wind system: Case study Al-Tafilah cement factory, Jordan,” *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 30, no. August, pp. 24–36, 2018, doi: 10.1016/j.seta.2018.08.008
- [68] G. Moumin *et al.*, “CO2 emission reduction in the cement industry by using a solar calciner,” *Renew. Energy*, vol. 145, pp. 1578–1596, 2020, doi: 10.1016/j.renene.2019.07.045
- [69] D. Gielen, F. Boshell, D. Saygin, M. D. Bazilian, N. Wagner, R. Gorini, “The role of renewable energy in the global energy transformation,” *Energy Strateg. Rev.*, vol. 24, no. June 2018, pp. 38–50, 2019, doi: 10.1016/j.esr.2019.01.006
- [70] T. Welton, “Solvents and sustainable chemistry,” *Proc. R. Soc. A*, vol. 471, no. 2183, pp. 1–26, 2015, doi: 10.1098/rspa.2015.0502.
- [71] A. Hasanbeigi, L. Price, E. Lin, “Emerging energy-efficiency and CO2emission-reduction technologies for cement and concrete production: A technical review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, no. 8, pp. 6220–6238, 2012, doi: 10.1016/j.rser.2012.07.019