



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Química

**EVALUACIÓN DEL IMPACTO GENERADO SOBRE LOS CICLOS DE  
RECIRCULACIÓN INTERNA, POR EL USO DE COMBUSTIBLES ALTERNOS,  
PARA OPTIMIZAR LA CARGA TÉRMICA EN EL PROCESO DE CLINKERIZACIÓN  
DE UN HORNO ROTATORIO**

**Pedro Luis Castañeda Mendez**

Asesorado por MBA Ing. Lee Stevens Hernández Rivera

Guatemala, julio de 2023



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN DEL IMPACTO GENERADO SOBRE LOS CICLOS DE  
RECIRCULACIÓN INTERNA, POR EL USO DE COMBUSTIBLES ALTERNOS,  
PARA OPTIMIZAR LA CARGA TÉRMICA EN EL PROCESO DE CLINKERIZACIÓN  
DE UN HORNO ROTATORIO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**PEDRO LUIS CASTAÑEDA MENDEZ**  
ASESORADO POR MBA ING. LEE STEVENS HERNÁNDEZ RIVERA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO QUÍMICO**

GUATEMALA, JULIO DE 2023



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martinez
VOCAL III	Ing. José Milton De León Bran
VOCAL IV	Ing. Kevin Vladimir Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADOR	Ing. Jorge Emilio Godínez Lémus
EXAMINADOR	Ing. Adolfo Narciso Gramajo Antonio
EXAMINADOR	Ing. César Ariel Villela Rodas
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez



## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**EVALUACIÓN DEL IMPACTO GENERADO SOBRE LOS CICLOS DE  
RECIRCULACIÓN INTERNA, POR EL USO DE COMBUSTIBLES ALTERNOS,  
PARA OPTIMIZAR LA CARGA TÉRMICA EN EL PROCESO DE CLINKERIZACIÓN  
DE UN HORNO ROTATORIO**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrados, con fecha 22 de abril de 2023.

**Pedro Luis Castañeda Mendez**







**EEPFI-PP-0404-2023**

Guatemala, 22 de abril de 2023

**Director**  
**Williams G. Álvarez Mejía**  
Escuela De Ingeniería Química  
Presente.

**Estimado Ing. Álvarez**

Reciba un cordial saludo de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería.

El propósito de la presente es para informarle que se ha revisado y aprobado el Diseño de Investigación titulado: **EVALUACIÓN DEL IMPACTO GENERADO SOBRE LOS CICLOS DE RECIRCULACIÓN INTERNA, POR EL USO DE COMBUSTIBLES ALTERNOS, PARA OPTIMIZAR LA CARGA TÉRMICA EN EL PROCESO DE CLINKERIZACIÓN DE UN HORNO ROTATORIO**, el cual se enmarca en la línea de investigación: **Área de Operaciones - Optimización de operaciones y procesos**, presentado por el estudiante **Pedro Luis Castañeda Mendez** carné número **201612284**, quien optó por la modalidad del "PROCESO DE GRADUACIÓN DE LOS ESTUDIANTES DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA OPCIÓN ESTUDIOS DE POSTGRADO". Previo a culminar sus estudios en la Maestría en ARTES en Gestion Industrial.

Y habiendo cumplido y aprobado con los requisitos establecidos en el normativo de este Proceso de Graduación en el Punto 6.2, aprobado por la Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería en el Punto Décimo, Inciso 10.2 del Acta 28-2011 de fecha 19 de septiembre de 2011, firmo y sello la presente para el trámite correspondiente de graduación de Pregrado.

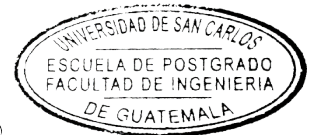
Atentamente,

*"Id y Enseñad a Todos"*

**Lee Stevens Hernández Rivera**  
Ingeniero Químico  
Colegiado No. 2239

**Mtro. Lee Stevens Hernández Rivera**  
Asesor(a)

**Mtro. Hugo Humberto Rivera Perez**  
Coordinador(a) de Maestría



**Mtro. Edgar Darío Álvarez Cotí**  
Director  
Escuela de Estudios de Postgrado  
Facultad de Ingeniería







EEP.EIQ.0403.2023

El Director de la Escuela De Ingenieria Quimica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el visto bueno del Coordinador y Director de la Escuela de Estudios de Postgrado, del Diseño de Investigación en la modalidad Estudios de Pregrado y Postgrado titulado: **EVALUACIÓN DEL IMPACTO GENERADO SOBRE LOS CICLOS DE RECIRCULACIÓN INTERNA, POR EL USO DE COMBUSTIBLES ALTERNOS, PARA OPTIMIZAR LA CARGA TÉRMICA EN EL PROCESO DE CLINKERIZACIÓN DE UN HORNO ROTATORIO**, presentado por el estudiante universitario **Pedro Luis Castañeda Mendez**, procedo con el Aval del mismo, ya que cumple con los requisitos normados por la Facultad de Ingeniería en esta modalidad.

ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. Williams G. Álvarez Mejía; Mg.I.Q., M.U.I.E.  
Director  
Escuela De Ingenieria Quimica

Guatemala, abril de 2023





**USAC**  
TRICENTENARIA  
Universidad de San Carlos de Guatemala

Decanato  
Facultad e Ingeniería

24189101- 24189102

LNG.DECANATO.OIE.33.2023

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al Trabajo de Graduación titulado: **EVALUACIÓN DEL IMPACTO GENERADO SOBRE LOS CICLOS DE RECIRCULACIÓN INTERNA, POR EL USO DE COMBUSTIBLES ALTERNOS, PARA OPTIMIZAR LA CARGA TÉRMICA EN EL PROCESO DE CLINKERIZACIÓN DE UN HORNO ROTATORIO**, presentado por: **Pedro Luis Castañeda Mendez** después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Firmado electrónicamente por: José Francisco Gómez Rivera  
Motivo: Orden de impresión  
Fecha: 17/07/2023 11:23:36  
Lugar: Facultad de Ingeniería, USAC.

Ing. José Francisco Gómez Rivera  
Decano a.i.



Guatemala, julio de 2023

Para verificar validez de documento ingrese a <https://www.ingenieria.usac.edu.gt/firma-electronica/consultar-documento>

Tipo de documento: Correlativo para orden de impresión Año: 2023 Correlativo: 33 CUI: 3188676640501

Escuelas: Ingeniería Civil, Ingeniería Mecánica Industrial, Ingeniería Química, Ingeniería Mecánica Eléctrica, - Escuela de Ciencias, Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (ERIS). Postgrado Maestría en Sistemas Mención Ingeniería Vial. Carreras: Ingeniería Mecánica, Ingeniería Electrónica, Ingeniería en Ciencias y Sistemas. Licenciatura en Matemática. Licenciatura en Física. Centro de Estudios Superiores de Energía y Minas (CESEM). Guatemala, Ciudad



## **ACTO QUE DEDICO A:**

- Dios** Fuente de amor y sabiduría. Agradezco Su guía constante en mi camino, la luz en mis decisiones, y el amor que me condujo a personas maravillosas.
- Mis padres** Roberto Castañeda e Ivone Mendez, agradezco profundamente su tiempo, sabiduría y confianza. Sus consejos han formado mis principios y me inspiran a ser una mejor persona cada día.
- Mis abuelos** Roberto Castañeda (q. e. p. d.), Carlos Mendez, Juana Gil, y María Oviedo (q. e. p. d.), su legado de amor, servicio y sabiduría es mi fuente de inspiración y fortaleza. Gracias por su paciencia y solidaridad inquebrantable.
- Mi familia** Alma, Mayra, Irma, Luis (q. e. p. d.) y Carmen Mendez; Olga, Claudia, Selvin, Edgar, Carlos y Diego Castañeda; y Roberto Díaz. gracias por fortalecer nuestros lazos y enriquecer mi crecimiento humano y profesional con su cariño y afecto incondicional.





## **AGRADECIMIENTOS A:**

### **Universidad de San Carlos de Guatemala**

Cuyos recursos y oportunidades han sido fundamentales en mi formación. Gracias por ser un faro de conocimiento y servicio, guiando con visión hacia una Guatemala libre y próspera.

### **Mis amigos**

Brandon García, Mishelle Gómez, Elena Martínez, Madelyn Barrios, Cesia Bravo, María Franco, María Tórtola, Yasmín Caal, Raúl Ruano, Gabriela Rabanales, Elden Thompson, Yesenia Gonzáles, David Beltetón, Brian López, Josué Godoy, Fernanda Alburez, María Zapeta y Paula Nájera; y a mis amigos en general. Su empatía y humildad han sido pilares fundamentales en nuestra jornada compartida. Su constante respeto y apoyo han fortalecido mi determinación y enriquecido mi experiencia.

### **Ingenieros**

Adela Marroquín, Casta Zeceña y Adolfo Gramajo. Cuyas enseñanzas han sido el cimiento de mi formación académica y profesional. Su implicación, más allá de las obligaciones, ha trascendido las aulas y ha dejado una marca imborrable en mi vida. Su sabiduría, sus consejos y su fe en mi potencial ha dejado una huella indeleble en mi camino,

impulsándome a superarme y a alcanzar mis metas.

**Mi asesor**

Lee Hernández su amistad, confianza y paciencia han sido vitales durante el desarrollo de este trabajo. Sus sabios consejos y crítica constructiva me han impulsado a sobrepasar mis propias expectativas. Su liderazgo ha sido la brújula, manteniendo mi voluntad firme y mi rumbo claro. Le agradezco sinceramente por su apoyo incondicional.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....	V
LISTA DE SÍMBOLOS .....	VII
GLOSARIO .....	IX
RESUMEN .....	XIII
OBJETIVOS.....	XV
INTRODUCCIÓN .....	XVII
1. TÍTULO.....	1
1.1. Línea de investigación .....	1
2. ANTECEDENTES .....	3
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN .....	7
3.1. Planteamiento del problema .....	7
3.2. Contexto y descripción .....	8
3.3. Preguntas de investigación.....	9
3.3.1. Central .....	9
3.3.2. Auxiliares .....	9
3.4. Delimitación del problema .....	10
4. JUSTIFICACIÓN .....	11
5. NECESIDADES A CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN.....	15

6.	HIPÓTESIS.....	17
6.1.	Cloro calculado en clínker .....	18
6.1.1.	Hipótesis nula 1 .....	18
6.1.2.	Hipótesis alterna 1.....	18
6.2.	Relación de (álcalis – cloro) / azufre .....	18
6.2.1.	Hipótesis nula 2.....	18
6.2.2.	Hipótesis alterna 2.....	19
6.3.	Volatilidad de azufre.....	19
6.3.1.	Hipótesis nula 3.....	19
6.3.2.	Hipótesis alterna 3.....	19
7.	MARCO TEÓRICO .....	21
7.1.	Proceso industrial del cemento .....	21
7.1.1.	Molienda de harina cruda .....	25
7.1.1.1.	Química de la harina cruda .....	26
7.1.1.2.	Fuentes de azufre, cloro y álcalis en harina cruda .....	28
7.1.2.	Clinkerización .....	29
7.1.2.1.	Horno de clinkerización .....	30
7.1.2.1.1.	Precalentador.....	31
7.1.2.1.2.	Horno rotatorio .....	32
7.1.2.1.3.	Sistema de enfriamiento.....	32
7.1.2.2.	Etapas físicas y químicas.....	34
7.1.2.2.1.	Reacciones inferiores a 1300 °C .....	35
7.1.2.2.2.	Reacciones entre 1300 y 1450 °C .....	36
7.1.2.2.3.	Reacciones durante el enfriamiento .....	36

7.2.	Combustión industrial .....	37
7.2.1.	Reacciones químicas en la combustión.....	38
7.2.1.1.	Oxidación del azufre .....	39
7.2.1.2.	Reacciones del cloro en la combustión	40
7.2.2.	Elementos de la combustión.....	41
7.2.2.1.	Quemadores utilizados en hornos rotatorios.....	42
7.2.2.2.	Aire de combustión .....	43
7.2.3.	Combustibles industriales .....	44
7.2.3.1.	Combustibles alternos, AFR´s .....	45
7.2.3.2.	Tipos de AFR´s.....	46
7.2.3.3.	Uso de AFR´s en hornos de clinkerización .....	47
7.2.3.4.	Consideraciones para el proceso de clinkerización por el uso de AFR´s .....	49
7.3.	Ciclos de recirculación en el proceso de clinkerización .....	50
7.3.1.	Afinidad de elementos en circulación .....	50
7.3.2.	Mecanismos de reacción físicos y químicos .....	51
7.3.3.	Problemas derivados de los ciclos de recirculación .....	55
7.3.3.1.	Formación de revestimiento y anillos en el horno rotatorio.....	56
7.3.3.1.1.	Pegaduras en el precalentador de ciclones .....	56
7.3.3.1.2.	Formación de anillos en el túnel rotatorio.....	58
8.	PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS .....	59

9.	METODOLOGÍA .....	61
9.1.	Enfoque.....	61
9.2.	Alcance de la investigación .....	61
9.3.	Diseño .....	61
9.4.	Tipo de estudio.....	62
9.5.	Operacionalización de variables .....	62
9.6.	Fases de la investigación .....	63
9.7.	Fases de la investigación .....	63
9.7.1.	Fase 1 diseño de un simulador de costos ponderados .....	64
9.7.2.	Fase 2 Construcción de un modelo lineal múltiple ..	64
9.7.2.1.	Procedimiento para la realización de una corrida experimental.....	68
9.7.3.	Fase 3 Optimización a partir de un análisis integral .....	69
10.	TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE INFORMACIÓN .....	71
10.1.	Técnicas y plan de tabulación de datos .....	71
11.	CRONOGRAMA .....	73
12.	FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO .....	75
12.1.	Recursos humanos disponibles .....	75
12.2.	Recursos materiales disponibles.....	75
12.3.	Presupuesto y fuentes de financiamiento.....	76
	REFERENCIAS .....	79
	APÉNDICES.....	85
	ANEXOS.....	89

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

<b>Figura 1.</b>	Diagrama de proceso de fabricación del cemento.....	23
<b>Figura 2.</b>	Molino de bolas circuito cerrado .....	25
<b>Figura 3.</b>	Composición química de rocas sedimentarias.....	26
<b>Figura 4.</b>	Diagrama de horno de clinkerización.....	30
<b>Figura 5.</b>	Precalentadores y configuraciones de ciclones .....	31
<b>Figura 6.</b>	Horno rotatorio largo y corto .....	32
<b>Figura 7.</b>	Enfriador de parrillas móviles.....	33
<b>Figura 8.</b>	Química del proceso de clinkerización .....	34
<b>Figura 9.</b>	Distribución de los elementos de la combustión industrial.....	41
<b>Figura 10.</b>	Quemador con canales múltiples.....	42
<b>Figura 11.</b>	Relación entre el aire en exceso y la eficiencia .....	43
<b>Figura 12.</b>	Puntos de alimentación recomendados para AFR´s.....	48
<b>Figura 13.</b>	Representación de la transferencia de álcalis a la atmósfera gaseosa del horno .....	54
<b>Figura 14.</b>	Anillos y pegaduras en el sistema de clinkerización .....	57
<b>Figura 15.</b>	Diseño experimental para la configuración Principal: Coque de petróleo y Auxiliar: Búnker + Llanta .....	65
<b>Figura 16.</b>	Diseño experimental para la configuración Principal: Coque de petróleo y Auxiliar: Aceite + Llanta.....	66

## TABLAS

<b>Tabla 1.</b>	Clasificación de cementos hidráulicos según ASTM .....	21
<b>Tabla 2.</b>	Presencia de azufre, cloro y álcalis en materias primas .....	28
<b>Tabla 3.</b>	Principales componentes del clínker .....	29
<b>Tabla 4.</b>	Residuos relevantes usados como AFR´s.....	46
<b>Tabla 5.</b>	Influencia de elementos volátiles en el proceso .....	55
<b>Tabla 6.</b>	Operacionalización de variables.....	62
<b>Tabla 7.</b>	Operación de dosificación de llanta en desuso .....	67
<b>Tabla 8.</b>	Variables y técnicas de recolección.....	71
<b>Tabla 9.</b>	Cronograma del desarrollo de las fases de investigación .....	73
<b>Tabla 10.</b>	Materiales y equipos disponibles.....	75
<b>Tabla 11.</b>	Presupuesto .....	76



## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b>MJ/t</b>	Carga térmica, medida en mega julios por tonelada
<b>CTR/h</b>	Costo total en una escala relativa por hora
<b>CUR/h</b>	Costo unitario en una escala relativa por hora
<b>kg/min</b>	Flujo másico de combustible líquido, medida en kilogramos por minuto
<b>t/h</b>	Flujo másico de combustible sólido, medida en toneladas por hora
<b>kg</b>	Kilogramo
<b>ppm</b>	Partes por millón
<b>%m/m</b>	Porcentaje en masa
<b>%Ei</b>	Porcentaje que representa la carga térmica aportada por un combustible respecto a la carga térmica total.



## GLOSARIO

<b>(álcalis – cloro) /azufre</b>	Parámetro que indica la proporción entre la cantidad de azufre y la cantidad de álcalis (sodio y potasio) presentes en el sistema de clinkerización, expresado en términos de sus moles. Esta relación es importante para evaluar la estabilidad y formación de compuestos volátiles en el horno.
<b>Aceite AFR</b>	Combustible derivado de residuos, que puede incluir aceites industriales usados, para la producción de energía en hornos de clinkerización.
<b>Álcalis</b>	Compuestos químicos básicos que contienen metales alcalinos y alcalinotérreos, como sodio, potasio y calcio, que pueden ser volátiles en los hornos de clinkerización.
<b>Azufre</b>	Elemento químico no metálico que puede combinarse con otros elementos en el proceso de clinkerización, afectando la calidad del clínker y las emisiones gaseosas.
<b>Carga térmica</b>	Cantidad de calor requerida para mantener las condiciones de temperatura adecuadas en el horno de clinkerización, afectando la eficiencia energética y la calidad del producto.

<b>Cemento</b>	Material de construcción en polvo, compuesto principalmente de clínker molido y aditivos, que se endurece al mezclarse con agua, formando una masa resistente.
<b>Ciclón</b>	Dispositivo utilizado en los sistemas de clinkerización para separar y recuperar partículas sólidas de los gases calientes que salen del horno, mediante la fuerza centrífuga.
<b>Clínker</b>	Material sólido, poroso y vítreo, resultado de la cocción de materias primas como caliza y arcilla en el horno de clinkerización, utilizado como base para la producción de cemento.
<b>Clinkerización</b>	Proceso químico y térmico en el que las materias primas se calientan a altas temperaturas para formar clínker, en el horno rotativo de una planta de cemento.
<b>Cloro</b>	Elemento químico halógeno, altamente reactivo, presente en los sistemas de clinkerización, que puede formar compuestos volátiles en el horno.
<b>Cloro calculado</b>	Estimación de la cantidad de cloro presente en el clínker, que se utiliza para evaluar el impacto del cloro en la calidad del producto final.

<b>AFR´S</b>	Combustibles alternos de materiales de desecho, como neumáticos y aceites usados, utilizados como fuente de energía en la producción de clínker, en sustitución de combustibles convencionales.
<b>Combustibles Convencionales</b>	Fuentes de energía tradicionales, como carbón, gas natural y petróleo, empleadas en la producción de clínker.
<b>Combustión</b>	Proceso químico de oxidación de un combustible, liberando calor y generando productos de reacción, como dióxido de carbono y vapor de agua.
<b>Coque de petróleo</b>	Subproducto sólido del proceso de refinación de petróleo, utilizado como combustible en la producción de clínker debido a su alto contenido energético.
<b>Corrosión</b>	Degradación de materiales, especialmente metales, causada por procesos químicos y electroquímicos, como la exposición a ácidos, álcalis o agentes oxidantes.
<b>Elementos volátiles</b>	Compuestos que se evaporan o se desprenden fácilmente en forma de gas a temperaturas elevadas, como el cloro, azufre y álcalis en hornos de clinkerización.

<b>Harina cruda</b>	Mezcla de materias primas molidas, como caliza y arcilla, utilizada como precursora en la producción de clínker.
<b>Volatilidad de azufre</b>	Propensión del azufre a evaporarse en el proceso de clinkerización, influyendo en la formación de compuestos volátiles y la calidad del clínker
<b>XRD</b>	Técnica analítica para determinar la estructura cristalina de un material, como el clínker, a partir del patrón de difracción de rayos X incidentes
<b>XRF</b>	Método analítico para identificar y cuantificar los elementos químicos presentes en una muestra, como la harina cruda, mediante la emisión de rayos X.

## RESUMEN

El presente trabajo de graduación de modalidad pregrado postgrado tiene la finalidad de plantear la metodología de solución a la problemática planteada acerca de la necesidad de analizar el efecto de la sustitución de combustibles convencionales por alternos en el proceso de clinkerización realizado en un horno rotatorio con precalentador tipo ciclónico. Se establecieron dos escenarios para el uso de combustibles en el sistema seleccionado que incluyen la dosificación de coque de petróleo, búnker, aceite AFR y neumáticos en desuso.

Para ello se definieron objetivos que establecieron el alcance de la investigación. Se planteó la realización de un simulador en una hoja de cálculo de la evaluación de costos relativos para los combustibles. El siguiente objetivo se basó en el estudio correlacional del efecto de la variación de la carga térmica de cada combustible utilizado, en los quemadores auxiliar y principal, sobre la concentración de elementos circulantes de álcalis, cloro y azufre. Por último, se estableció el objetivo de rangos óptimos de carga térmica asociada a cada combustible que permitan obtener costos mínimos y condiciones de estas concentraciones aceptables para la operación del equipo.

Se determinó una metodología basada en la evaluación del historial de costos de los combustibles y de la aplicación de un diseño experimental en el que se evalúen la carga térmica relativa de cada combustible a un ensayo de balance de álcalis, cloro y azufre. A partir de ello se planificó integrar los modelos matemáticos, obtenidos de la aplicación del ensayo del balance de álcalis, cloro y azufre en el estudio correlacional, dentro del simulador de costos para optimizar la carga térmica asociada al proceso de clinkerización.





## **OBJETIVOS**

### **General**

Optimizar la operación de dosificación de combustibles para mantener condiciones aceptables de compuestos volátiles en el precalentador y túnel rotatorio; y minimizar los costos, para las diferentes configuraciones de combustibles utilizadas en los quemadores del horno de clinkerización.

### **Específicos**

1. Evaluar los costos relativos totales de las diferentes combinaciones de combustibles utilizados en el proceso de clinkerización a través de la implementación de un análisis de sensibilidad, en un simulador de costos de combustibles.
2. Caracterizar el efecto que tiene la variación de la carga térmica neta necesaria para mantener la calidad del clínker y el porcentaje de carga térmica aportada por cada combustible, para las configuraciones utilizadas en los quemadores, sobre los ciclos de recirculación de elementos volátiles, mediante la implementación de un ensayo de balance de álcalis, cloro y azufre en el sistema de clinkerización.
3. Determinar rangos óptimos de porcentaje de carga térmica aportada por cada combustible, para las configuraciones utilizadas en los quemadores, a través de un análisis integral de costos y resultados del balance de álcalis, cloro y azufre en el sistema de clinkerización.



## INTRODUCCIÓN

El presente protocolo de investigación tiene la finalidad de plantear y definir la importancia del problema de investigación consistente en la acumulación de elementos volátiles dentro del sistema de un horno rotatorio de clinkerización al sustituir una proporción de los combustibles convencionales por combustibles alternos en el quemador auxiliar. En su desarrollo se plantea una estructura para estudiar los costos y efectos de los ciclos de recirculación interna asociados a la dosificación de combustibles convencionales y alternos en el sistema de clinkerización.

El fenómeno de los ciclos de recirculación en el proceso de clinkerización tiene como consecuencia el aumento de la concentración de elementos volátiles en el sistema de interacción de harina cruda y gases de combustión en el horno. A partir de este fenómeno se derivan problemas como formación de incrustaciones en las paredes internas de la torre de ciclones, anillamientos en las zonas más frías del túnel rotatorio y corrosión de la estructura metálica de los equipos.

La sustitución de combustibles fósiles por combustibles alternos genera una variación en la cantidad de azufre y cloro que ingresa al sistema debido a los cambios en la composición química de estos. Estos cambios pueden causar una variación de la concentración de elementos circulantes que se encuentran en el sistema y por lo tanto aumentar los problemas asociados a los referidos.

Este estudio tiene una alta importancia en la optimización y control de las operaciones de producción de clínker. Con ello se busca generar información

sobre cómo varía la concentración de elementos circulantes al variar la carga térmica para los escenarios en los que únicamente se utilizan combustibles convencionales y en los que sí hay una sustitución de combustibles convencionales por combustibles alternos. A partir de esto se generará información útil para encontrar oportunidades de aumentar la tasa de sustitución de una forma sostenible y óptima.

# **1. TÍTULO**

Evaluación del impacto generado sobre los ciclos de recirculación interna, por el uso de combustibles alternos, para optimizar la carga térmica en el proceso de clinkerización de un horno rotatorio.

## **1.1. Línea de investigación**

El presente anteproyecto corresponde al área de operaciones, en la línea de optimización de operaciones y procesos.



## 2. ANTECEDENTES

El problema de investigación propuesto presenta una alta relevancia a nivel mundial, en el sector productivo de cemento. El interés principal de los investigadores en este campo se centra en estudiar el efecto de la acumulación de elementos volátiles, que acrecienta con el uso de combustibles alternos, sobre la productividad de la operación de clinkerización. Estudios anteriores han abarcado desde técnicas para disminuir la presencia de elementos volátiles y el aprovechamiento de subproductos resultantes de la implementación de dichos métodos, hasta los impactos en la disminución de la transferencia de calor y momento provocados por la formación de anillos en el sistema de circulación de gases.

En sistemas modernos una solución técnica para reducir los fenómenos de recirculación es la instalación de un sistema bypass. En el estudio de Lanzerstorfer titulado “Residue from the chloride bypass de-dusting of cement kilns: Reduction of the chloride content by air classification for improved utilisation”, en 2016, se realizó una clasificación de la fracción fina de las muestras del residuo obtenido por el sistema bypass a través del método de clasificación por corriente de aire en un ciclón. Se determinó que la concentración de cloro y potasio es de dos a tres veces más alta en la fracción de finos que en la fracción de material grueso, encontrándose que la última referida se puede retornar al proceso de alimentación al horno (Lanzerstorfer, 2016).

En la Universidad Zhejiang, China se publicó la investigación “Study on the evolution and transformation of Cl during Co-incineration of a mixture of rectification residue and raw meal of a cement kiln”. Se evaluó la concentración

de cloro presente dentro del gas de escape, cenizas volantes y residuos sólidos en un diseño experimental enfocado en la calcinación de harina cruda bajo diversas condiciones, utilizando combustibles ricos en cloro. Se observó que las mayores concentraciones de cloro se hallaban en el gas de escape y los residuos sólidos. La temperatura de calcinación y el tiempo de residencia están directamente relacionados con la presencia de cloro en los gases, mientras que un decrecimiento sobre los residuos sólidos se asocia con un incremento en estas variables (Wang et al., 2018).

En la Facultad de Ingeniería Química de la “Universidad de San Carlos de Guatemala” se publicó el estudio de tesis titulado como “Evaluación del impacto de cloro proveniente de la alimentación de combustible alterno en el horno de la línea dos para la fabricación de clínker en una industria cementera”. Se tuvo como objetivo evaluar el efecto que tiene el cloro proveniente del combustible derivado de basura utilizado como AFR en el proceso de clinkerización a partir de la implementación de un balance químico. En el que se determinó que la concentración de cloro en el sistema aumenta de forma significativa al tener un aumentar la cantidad de combustible alterno sin afectar la calidad (Del Cid, 2018).

En la escuela de Ingeniería en Energía y Potencia de la Universidad de Ciencia y Tecnología de Huazhong, China, se publicó el artículo nombrado como “Thermochemical behavior of three sulfates ( $\text{CaSO}_4$ ,  $\text{K}_2\text{SO}_4$  and  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) blended with cement raw materials ( $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3$ )”. En él se estudió el comportamiento térmico de tres sulfatos en estado puro y las reacciones en estado sólido de ellos con los óxidos principales que componen la harina cruda de cemento. Se concluyó que en estado puro el sulfato que contiene potasio es térmicamente más estables que los otros dos. En el estudio de la reacción con los óxidos de harina cruda se determinó que debido a su estabilidad el  $\text{K}_2\text{SO}_4$  puede reaccionar con el óxido de aluminio para formar  $\text{K}_3\text{AlO}_3$  en las



temperaturas de sinterización. Además, el  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  se puede fundir e integrar a la fase líquida, reaccionando con el C2S para formar  $\text{NC}_3\text{S}_2$  inhibiendo la formación de C3S (Wang et al., 2019).

En planta cementera Kattameya, en colaboración con la Facultad de Estudios de Postgrados para Ciencias Avanzadas de la Universidad de Beni-Suef, Egipto se realizó la investigación titulada “Enhancing the efficiency of a cement plant kiln using modified alternative fuel”. El propósito del estudio consistió en examinar la sustitución de combustibles fósiles con una mezcla de biomasa que incluía cáscara de arroz y combustible proveniente de desechos, así como evaluar su impacto en las características físicas del clínker. Basándose en los datos obtenidos, se concluyó que el porcentaje máximo de reemplazo para este tipo de energético alternativo es del 17%, en el cual no se percibe una incidencia notable en las cualidades físicas del clínker ni en la liberación de gases (Hay et al., 2020).

En la Universidad Tecnológica de Nanjing, China se realizó el estudio titulado “The effect of gaseous  $\text{SO}_2$  secondary sintering on the cement composition and crystal structure”. El propósito de este estudio fue investigar el efecto del  $\text{SO}_2$  gaseoso a distintas temperaturas en la concentración y la estructura cristalina del clínker sinterizado, por medio de la aplicación de técnicas de difracción de rayos X (XRD). Se concluyó que la presencia de dióxido de azufre promueve la descomposición de la alita y mueve el equilibrio químico a la formación de belita (Kang et al., 2021).



### **3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN**

#### **3.1. Planteamiento del problema**

La sustitución de combustibles derivados del petróleo por combustibles alternos, AFR por sus siglas en inglés, ha permitido a las empresas productoras de cemento disminuir el impacto ambiental a través de la reducción de la huella de carbono en la etapa de clinkerización. Sumado a la reducción de costos por representar fuentes de energía más económicas, cada año aumenta el interés por lograr un porcentaje de sustitución mayor por AFR's. Por esta razón en este sector productivo ha crecido el interés en desarrollar proyectos de innovación para encontrar oportunidades que permitan aumentar los índices de sustitución de una forma sostenible.

Uno de los factores críticos en la etapa de clinkerización es mantener una presión diferencial de los gases de combustión estable a través del tiempo a lo largo del túnel rotatorio y la torre de ciclones. Esta estabilidad se ve afectada por el fenómeno de los ciclos de recirculación, en el que la interacción de los compuestos de cloro y azufre, presentes en los gases de combustión, interactúan con óxidos de la harina cruda formando compuestos volátiles en las condiciones de operación. Como consecuencia de esto existe una acumulación en el sistema de estos elementos que ocasiona incrustaciones en las paredes internas de la torre de ciclones y formación de anillos en el túnel rotatorio. La formación de estas obstrucciones ocasiona variaciones en la presión diferencial del sistema de gases y, en ocasiones, paros de producción por atoramiento de ciclones.

Sustituir los combustibles convencionales por AFR's representa introducir un cambio en la composición de la atmósfera interna del horno rotatorio. Esto incide en que las concentraciones de azufre y cloro aumenten o disminuyan dependiendo de la composición química de los combustibles. En la línea de producción de clínker que se analiza se utilizan como AFR's neumáticos deteriorados y desechos de aceites. Esta variación en la configuración de combustibles utilizados en los quemadores causa la necesidad de estudiar las variaciones en el equilibrio químico existente entre la harina y los gases de combustión.

Otro factor de importancia en la operación del horno es la carga térmica suministrada, que es la energía calorífica proporcionada por el combustible por unidad másica de clínker producido. Este indicador se debe manejar en niveles adecuados para que la concentración de azufre y cloro en los gases de combustión no exceda la disponibilidad de minerales en la harina cruda que den lugar a la formación de minerales con baja volatilidad. Se busca establecer la relación existente entre la carga térmica y la concentración de elementos circulantes con el objetivo de optimizar el uso de combustibles alternos y encontrar oportunidades para aumentar los porcentajes de sustitución de combustibles convencionales.

### **3.2. Contexto y descripción**

La línea de fabricación de clínker en la empresa analizada es la que se ve más afectada ante la formación de incrustaciones, debido a que el diámetro interno promedio de los ductos para paso de gases en la torre de ciclones es más pequeño comparado con las otras líneas. La causa principal de paros en la producción de esta línea son los atoramientos de ciclones por caída de material

incrustado. A causa de esto ha crecido el interés por controlar cada vez de mejor forma la concentración de elementos circulantes en el horno.

Como parte del compromiso ambiental se proyecta un crecimiento de la tasa de sustitución de combustibles convencionales por AFR's. Este es otro factor que aumenta el interés por estudiar el efecto del uso de estos combustibles en la operación. Así mismo, es necesario optimizar el valor de carga térmica utilizada para cada configuración de combustibles utilizados en los quemadores del horno para lograr la excelencia operacional y optimizar los costos de producción.

### **3.3. Preguntas de investigación**

A continuación, se presentan las preguntas de investigación que darán lugar a los objetivos y el diseño experimental del proyecto. Se plantea integrar los principales intereses derivados del uso de combustibles alternos para alcanzar el objetivo de optimizar operaciones y procesos en el área de producción de clínker.

#### **3.3.1. Central**

¿Cómo se puede optimizar la operación de dosificación de combustibles para mantener niveles aceptables de azufre en harina caliente en la recámara del horno de clinkerización para las diferentes configuraciones de combustibles utilizadas en los quemadores?

#### **3.3.2. Auxiliares**

1. ¿Cómo se pueden evaluar los costos de insumos energéticos al variar la proporción de combustibles en los quemadores del horno de clinkerización

y cómo se puede evaluar las posibles variaciones de estos debido a cambios en los precios?

2. ¿Cuál es el comportamiento de la concentración de elementos volátiles en el sistema de clinkerización, variando la configuración de combustibles alternos y convencionales en los quemadores del horno?
3. ¿Qué rango de proporciones de combustibles utilizados en el proceso de clinkerización representan la combinación óptima para la operación en términos de costos y sostenibilidad de acumulación de elementos circulantes en el sistema?

### **3.4. Delimitación del problema**

El estudio se realizará en una línea de producción de clínker, específicamente en el horno rotatorio de clinkerización, centrándose en el fenómeno de los ciclos de recirculación interna, por lo que el volumen de control definido abarca desde la alimentación de harina cruda, en el ciclón uno, hasta la salida de clínker en las enfriadoras tipo satélite. Así mismo el diseño experimental se realizará variando la carga térmica y los diferentes combustibles utilizados en los quemadores del horno: búnker, coque de petróleo, neumáticos en desuso y aceite. El ajuste de los parámetros de operación, el muestreo y los análisis químicos serán realizados dentro de las instalaciones de la empresa.

## 4. JUSTIFICACIÓN

Este estudio de tesis tiene como objetivo contribuir a la adopción de prácticas sostenibles en la industria, mediante la identificación de fuentes de energía alternativas óptimas y la implementación de proyectos de mejora que permitan el desarrollo de la empresa en un entorno sostenible. Con el compromiso ambiental como principal motivación, se busca reducir el impacto ambiental de las industrias que utilizan combustibles convencionales en sus procesos productivos.

La investigación es parte de la motivación personal no solo porque permitirá contribuir al compromiso de la empresa con la sostenibilidad, sino también porque brindará la oportunidad de liderar proyectos de mejora en la línea de producción supervisada. Otra de las causas de esto es la adquisición de nuevos conocimientos y experiencias en liderazgo de proyectos, excelencia en la ejecución y en la comprensión de los fenómenos fisicoquímicos que ocurren en el proceso de clinkerización.

Se tiene un compromiso por trabajar en estrecha colaboración con el equipo de producción y otros departamentos relevantes de la empresa para garantizar que los resultados de esta investigación se implementen de manera efectiva y se obtengan los máximos beneficios. Se tiene seguridad de que esta experiencia también ayudará a obtener un crecimiento profesional y aportar al desarrollo del liderazgo en el campo de la sostenibilidad y la gestión de procesos industriales.

Los resultados obtenidos a partir del análisis de los ciclos de recirculación de elementos volátiles y la evaluación de los costos asociados a la sustitución de combustibles permitirán garantizar el uso óptimo de los recursos energéticos en condiciones sostenibles, lo que se traducirá en un impacto positivo en el medio ambiente y en la consolidación de la empresa como líder en su sector.

Por lo que, este estudio de tesis es un llamado a la acción para las industrias que buscan reducir su impacto ambiental y asumir su responsabilidad con el futuro del planeta. Con una visión innovadora y comprometida con la sostenibilidad, el investigador se propone aportar al desarrollo de soluciones que permitan avanzar hacia un futuro más justo y equitativo para las generaciones venideras.

La necesidad de abordar el tema de la sustitución óptima de combustibles convencionales por alternativos en un horno de clinkerización se debe a los problemas operativos que pueden surgir debido a la acumulación de elementos volátiles en el sistema, como compuestos de azufre, cloro y álcalis. Estos elementos pueden causar obstrucciones por incrustaciones, generando anillos en el túnel rotatorio y atoramientos de ciclones, lo que puede dar lugar a paros de producción y pérdida de eficiencia en el proceso.

En este sentido, la sustitución de AFR (combustibles alternativos) ocasiona un cambio en los ciclos de recirculación, lo que puede afectar al proceso de clinkerización. Por ello, es necesario entender y explicar cómo estos cambios en los ciclos de recirculación afectan al proceso y cómo se pueden implementar proyectos de mejora para garantizar condiciones sostenibles para la operación.

Para cumplir con la aplicación del diseño experimental se cuenta con recursos materiales como el sistema del horno de clinkerización, equipo de



recolección de muestras y para análisis fisicoquímicos que será proveído por el área de control de calidad de la planta, material de oficina y software de hoja de cálculo digital. Se requiere de personal capacitado para muestreo en los puntos asignados en la torre de ciclones, sistema de alimentación y descarga de clínker del horno; analistas de laboratorio para la realización de los análisis fisicoquímicos de harina caliente y clínker; e instrumentista para la verificación del correcto funcionamiento de analizadores de gases, pesadoras de combustibles y alimentación de harina cruda.

Se pretende que los resultados del proyecto de investigación sirvan como un recurso informativo que de origen a la búsqueda de oportunidades para aumentar los niveles de sustitución de combustibles convencionales por AFR's, ya que de esta forma mejorará la sostenibilidad de las operaciones y el compromiso medioambiental del sector productivo del cemento.

En este contexto, la presente tesis busca contribuir al desarrollo de soluciones sostenibles y eficientes en el proceso de clinkerización a través del estudio de la sustitución óptima de combustibles convencionales por alternativos. Asimismo, se busca generar conocimiento sobre el impacto que se tiene sobre los ciclos de recirculación de elementos volátiles y cómo implementar proyectos de mejora para el desarrollo de la empresa y reafirmar el compromiso con la sostenibilidad de las operaciones.



## 5. NECESIDADES A CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN

Este estudio pretende cubrir la necesidad de explicar la relación causal de sustituir combustibles convencionales derivados del petróleo con una composición química establecida por combustibles alternos (AFR's) con diferente composición y el fenómeno de los ciclos de recirculación de elementos volátiles en el proceso de clinkerización de la planta de producción evaluada. Debido a que se tiene el interés por aumentar la tasa de sustitución actual para. Además de reducir los problemas operacionales causados por incrustación de elementos volátiles en las zonas de condensación del sistema de clinkerización.

Para cubrir esta necesidad, se ha diseñado un esquema de solución que consta de tres fases. En la primera fase, se desarrollará un simulador de costos totales del uso de combustibles, que permitirá ingresar las combinaciones de combustibles en sus respectivas proporciones para una carga térmica total y obtener el costo total. En la segunda fase, se llevarán a cabo dos diseños experimentales con el objetivo de evaluar la relación entre la proporción de coque de petróleo utilizado en el quemador principal y la de combustible líquido en el quemador auxiliar, para las diferentes configuraciones de combustibles utilizadas en el quemador del horno de clinkerización. En la tercera fase, se integrará el modelo matemático obtenido en los diseños experimentales al simulador de costo total ponderado, a fin de programar una herramienta solver que permita determinar la combinación de combustibles que cumpla con los criterios de costo total mínimo y relación óptima de (álcalis – cloro) / azufre.

Se espera que este esquema de solución permita cubrir la necesidad de optimización de la operación de dosificación de combustibles en la planta de

producción evaluada, lo cual contribuirá a mejorar la eficiencia del proceso productivo y reducir los problemas operacionales causados por incrustaciones de elementos volátiles en las zonas de condensación del sistema de clinkerización. Además, esta investigación permitirá adquirir conocimientos y experiencias en liderar proyectos, excelencia de ejecución y sobre conocimientos científicos que ocurren como fenómenos en el proceso de clinkerización, lo cual podrá ser aplicado en la línea de producción supervisada.

## 6. HIPÓTESIS

Dentro del estudio de investigación se plantea realizar la medición experimental de concentraciones de elementos volátiles de cloro, azufre y álcalis en puntos de muestreo de harina cruda, harina caliente, clínker y combustibles al variar las combinaciones de combustibles dentro de los siguientes escenarios.

- Principal: Coque de petróleo y Auxiliar: Búnker + Llanta
- Principal: Coque de petróleo y Auxiliar: Aceite + Llanta

La variable independiente o de control utilizada en los diseños experimentales es la proporción de energía aportada por cada combustible % (Energía aportada por el combustible  $i$  / Energía total). Al tratarse de una combinación con base en 100% se tendrías dos variables independientes. Además, para cada repetición se solicitará ajustar la carga térmica total (MJ/t clínker) al valor que cumpla en condiciones normales de calidad del clínker, debido a esto se tendría una tercera variable independiente.

Para analizar los resultados de los diseños experimentales propuestos, se realizará un análisis de varianza (ANOVA), una técnica estadística que permite comparar si existen diferencias significativas entre las medias de dos o más grupos. En este caso, se compararán las medias los indicadores relacionados a las concentraciones de los elementos volátiles para cada combinación de proporción de energía aportada por cada combustible y carga térmica total utilizada en los quemadores del horno de clinkerización.

## **6.1. Cloro calculado en clínker**

### **6.1.1. Hipótesis nula 1**

No existe diferencia significativa en el cloro calculado en clínker obtenido del balance de álcalis, cloro y azufre al variar proporción de energía aportada por el coque de petróleo en el quemador principal y el combustible líquido del quemador auxiliar, así como de la carga térmica total.

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3$$

### **6.1.2. Hipótesis alterna 1**

Existe diferencia significativa en el cloro calculado en clínker obtenido del balance de álcalis, cloro y azufre al variar proporción de energía aportada por el coque de petróleo en el quemador principal y el combustible líquido del quemador auxiliar, así como de la carga térmica total.

$$H_1: \mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3$$

## **6.2. Relación de (álcalis – cloro) / azufre**

### **6.2.1. Hipótesis nula 2**

No existe diferencia significativa en la relación de (álcalis – cloro) / azufre al variar proporción de energía aportada por el coque de petróleo y el combustible líquido del quemador auxiliar, así como de la carga térmica total.

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3$$

### **6.2.2. Hipótesis alterna 2**

Existe diferencia significativa en la relación de (álcalis – cloro) / azufre al variar proporción de energía aportada por el coque de petróleo y el combustible líquido del quemador auxiliar, así como de la carga térmica total.

$$H1: \mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3$$

### **6.3. Volatilidad de azufre**

#### **6.3.1. Hipótesis nula 3**

No existe diferencia significativa en la volatilidad de azufre obtenida al variar proporción de energía aportada por el coque de petróleo y el combustible líquido del quemador auxiliar, así como de la carga térmica total.

$$H0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3$$

#### **6.3.2. Hipótesis alterna 3**

Existe diferencia significativa en la volatilidad de azufre obtenida al variar proporción de energía aportada por el coque de petróleo y el combustible líquido del quemador auxiliar, así como de la carga térmica total.

$$H1: \mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3$$





## 7. MARCO TEÓRICO

### 7.1. Proceso industrial del cemento

El cemento se clasifica como un aglomerante de tipo hidráulico y de carácter inorgánico, que se utiliza ampliamente en el ámbito de la construcción para la producción de concreto y morteros. Al ser amasado con agua reacciona para dar origen a productos hidratados con propiedades mecánicas resistentes. La reacción química de hidratación genera un endurecimiento debido a la presencia de productos de la reacción, consistentes en silicatos cálcicos hidratados, así como de aluminatos hidratados (Sanjuán y Chinchón, 2014).

**Tabla 1.**

*Clasificación de cementos hidráulicos según ASTM*

Norma	Clasificaciones	Descripción
ASTM C150 para cementos tipo portland	Tipo I	Resistencia a la compresión normal.
	Tipo II	Resistencia a la compresión moderada y resistencia a sulfatos.
	Tipo III	Fraguado rápido y alta resistencia a la compresión.
	Tipo IV	Fraguado lento con bajo calor de hidratación
	Tipo V	Alta resistencia a sulfatos
ASTM C595 para cementos adicionados	Tipo IS	Adicionado con escoria de alto horno
	Tipo IP	Adicionado con puzolana natural.
	Tipo IL	Adicionado con caliza
ASTM C1157 para ambos tipos de cementos hidráulicos	Tipo GU	Cemento para uso general en la construcción
	Tipo HE	Alta resistencia temprana
	Tipo MS	Moderada resistencia a sulfatos
	Tipo HS	Alta resistencia a sulfatos
	Tipo MH	Moderado calor de hidratación
	Tipo LH	Bajo Calor de hidratación

Nota. Clasificación de cementos hidráulicos de acuerdo con normas. Obtenido de ASTM International (2012 y 2010). *ASTM C150-07*, *ASTM C598-08a* y *ASTM C1157-08a*. Consultado el 27 de febrero de 2023.

La “Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales, ASTM por sus siglas en inglés establece los requisitos, especificaciones y clasificaciones de los cementos hidráulicos como portland y adicionados en las normas ASTM C-150, ASTM C-595 y ASTM C-1157” (ASTM International, 2012, p.1). En ellas se clasifica el cemento portland como aquel constituido únicamente por clínker de cemento portland, agua, sulfato de calcio y caliza de origen natural (ASTM International, 2012). Mientras que en la ASTM C-595 se extiende la clasificación para cementos adicionados con escoria de alto horno, puzolana y caliza (ASTM International, 2010).

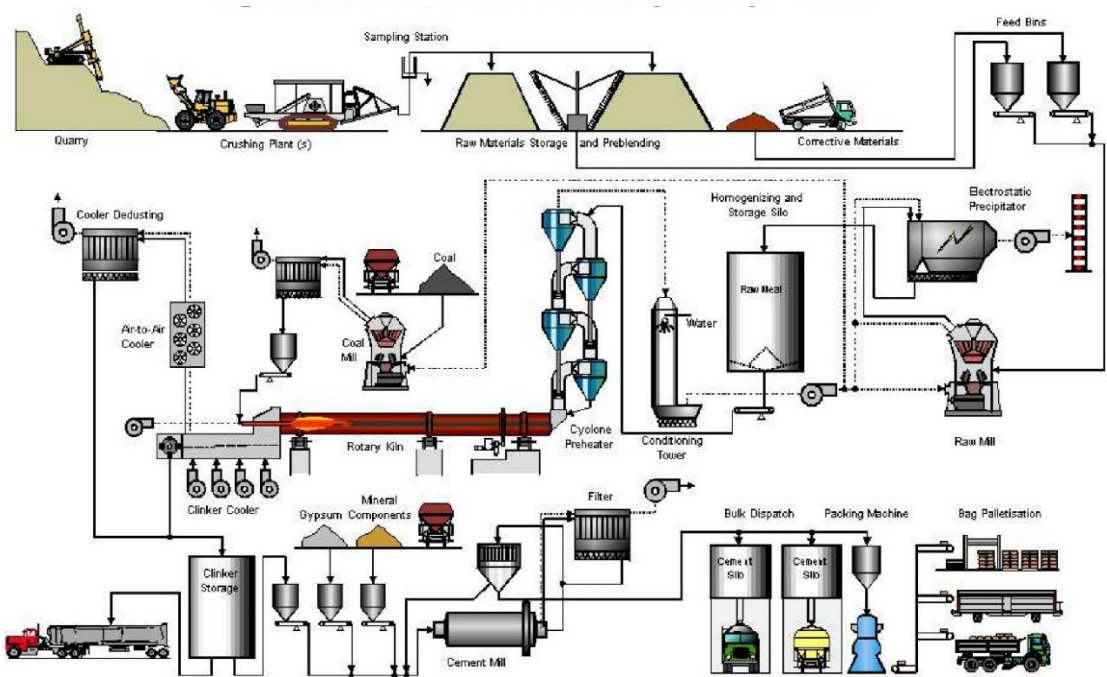
El proceso de producción de cemento se basa en la transformación química de minerales extraídos de la naturaleza, como piedra caliza y arcillas; consistentes principalmente en óxidos de calcio, sílice, aluminio y hierro; Mediante un proceso de calcinación, que forma parte de la clinkerización, los materiales crudos se introducen en un horno rotativo a elevadas temperaturas (alrededor de 1450°C). En estas condiciones, se lleva a cabo una compleja reacción química. Esta reacción produce el clínker de cemento, que luego se muele finamente junto con otros materiales, como sulfato de calcio y otras adiciones para producir cemento (European Commission Joint Research Centre, 2013).

Según CEMBUREAU, hay cuatro tipos principales de procesos de producción de cemento que se distinguen, principalmente, por la manera en que se procesa la materia prima antes de ingresar al horno rotativo de cemento y por cómo se calcina la materia prima dentro del horno. Estas variaciones influyen en la eficiencia energética, el costo de producción, la calidad del producto y la liberación de gases de efecto invernadero. Estos son el proceso de vía seca, de vía semiseca, de vía semihúmeda y de vía húmeda. El proceso de vía seca es el

más utilizado ya que en este proceso, la materia prima seca se alimenta directamente al horno rotatorio de cemento, sin ser mezclada previamente con agua. El proceso de vía seca es el más eficiente energéticamente, ya que la materia prima seca requiere menos energía para ser calentada en el horno (CEMBUREAU, 1999).

**Figura 1.**

*Diagrama de proceso de fabricación del cemento*



*Nota.* Diagrama de proceso de producción de cemento por vía seca con precalentador. Obtenido de CEMBUREAU (1999). "Best available techniques" for the cement industry. ([http://files.gamta.lt/aaa/Tipk/tipk/4\\_kiti%20GPGB/40.pdf](http://files.gamta.lt/aaa/Tipk/tipk/4_kiti%20GPGB/40.pdf)), consultado el 27 de febrero de 2023. De dominio público.

El primer paso en este proceso es la extracción de minerales. En esta fase, se obtiene la materia necesaria para la producción de cemento, compuesta principalmente de piedra caliza, arena, arcilla, y también mineral de hierro. La extracción de la materia prima se lleva a cabo mediante perforación y voladura

de la roca en una cantera, lugar donde se encuentra una alta concentración de dicha materia prima. Tras extraer la roca, se transporta a la siguiente etapa de la planta para su procesamiento.

Una vez que las materias primas son extraídas, se trasladan a la planta de fabricación de cemento. Posteriormente, las materias primas trituradas se combinan cuidadosamente para lograr una composición uniforme. En esta fase, es crucial controlar de manera precisa la cantidad y calidad de los materiales empleados para asegurar su calidad y homogeneidad del cemento producido. Finalmente, las materias primas mezcladas se introducen en el horno de cemento, donde ocurre la clinkerización y la conversión en clínker (CEMBUREAU, 1999).

La etapa de molienda de cemento es la última fase del proceso, donde el clínker previamente producido es mezclado con aditivos y se reduce a una granulometría adecuada para su uso como cemento (Sanjuán y Chinchón, 2014).

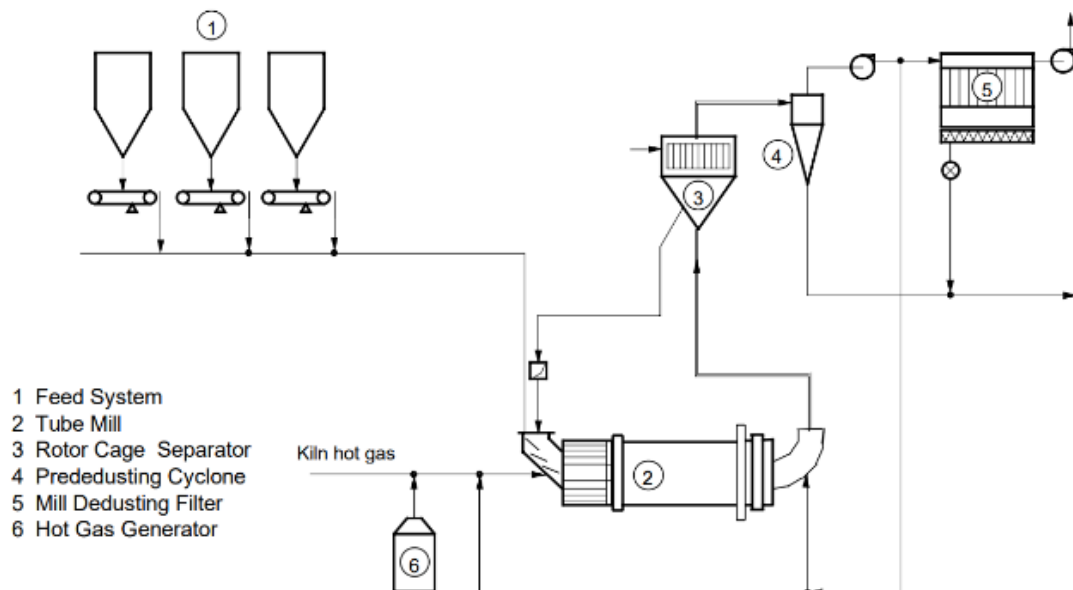
En esta etapa, el clínker junto con los aditivos (tales como yeso, puzolana, escoria de alto horno, entre otros) es introducido en molinos de bolas, que giran alrededor de su eje horizontal. Los molinos contienen bolas de acero como medio de molienda, que al caer sobre el clínker y los aditivos los trituran y pulverizan. El clínker y los aditivos son molidos a un tamaño de partícula óptimo, lo que permite una hidratación adecuada del cemento cuando se mezcla con agua. El cemento molido es luego transportado a silos de almacenamiento y posteriormente es envasado en bolsas o almacenado a granel en silos para su distribución y uso en la construcción (European Commission Joint Research Centre, 2013).

### 7.1.1. Molienda de harina cruda

La harina cruda consiste en una mezcla de los minerales que se transformarán en clínker en una etapa posterior. La harina cruda cumple con propiedades químicas como la proporción de los respectivos óxidos adecuada para producir clínker con una química óptima; así como de fineza adecuada para fomentar una transferencia de calor adecuada en el proceso de clinkerización. Para ello se emplea un proceso de disminución del tamaño de partícula conocido como molienda. La molienda tiene el principal objetivo de incrementar el área superficial del material al llevarlo hasta un tamaño de partícula deseado en el que se obtenga una reactividad adecuada en el siguiente paso del proceso (Schneider y Binder, 1983).

**Figura 2.**

*Molino de bolas circuito cerrado*



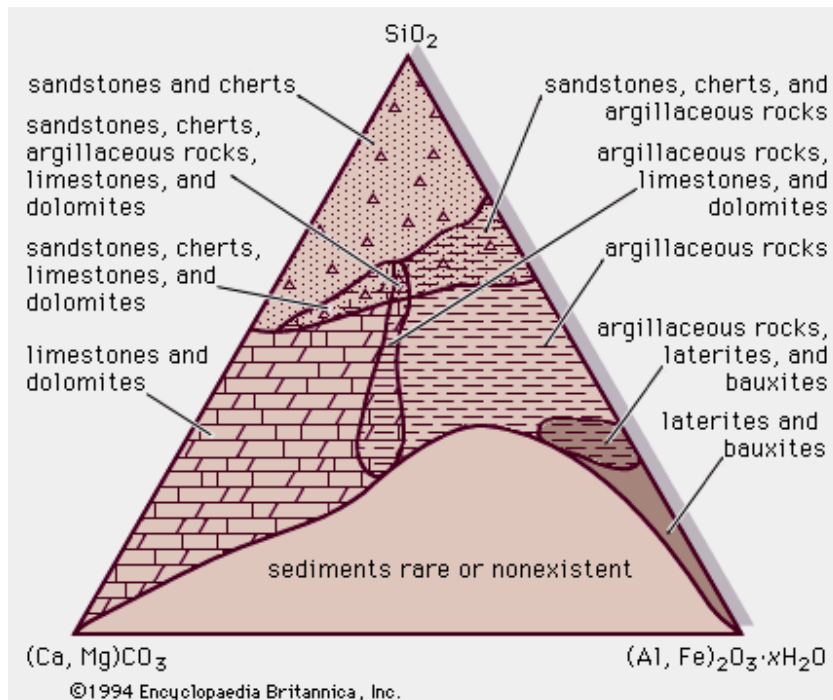
*Nota.* Diagrama producción de harina cruda. Obtenido de CEMBUREAU (1999). “Best available techniques” for the cement industry. ([http://files.gamta.lt/aaa/Tipk/tipk/4\\_kiti%20GPGB/40.pdf](http://files.gamta.lt/aaa/Tipk/tipk/4_kiti%20GPGB/40.pdf)), consultado el 27 de febrero de 2023. De dominio público.

### 7.1.1.1. Química de la harina cruda

Para la fabricación de clínker se utilizan como materias primas la piedra caliza, como fuente de  $\text{CaCO}_3$  que dará lugar a  $\text{CaO}$ ; y arcilla, como fuente de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Estos minerales se mezclan en el proceso de molienda para obtener proporciones requeridas. En la naturaleza estas rocas pueden ser encontradas de forma pura o en forma de mezcla (Knöfel, 1983). Idealmente se desea una roca que contenga los cuatro óxidos en la proporción requerida para producir clínker, aunque esto es difícil de obtener en la naturaleza con una disponibilidad alta. Por lo que la harina cruda se prepara a partir de calizas, arcillas y otras sustancias correctivas (Kumar, 2018).

**Figura 3.**

*Composición química de rocas sedimentarias*



*Nota.* Diagrama ternario de la composición rocas sedimentarias. Obtenido de Haaf, E., Schwab, F. y Bissell, H. (2022). *Sedimentary Rock*. (<https://www.britannica.com/science/sedimentary-rock>), consultado el 28 de febrero de 2023. De dominio público.

Para describir la composición química de la mezcla conocida como “harina cruda” se utilizan los óxidos de calcio, sílice, aluminio y hierro. Estas se derivan de la proporción de cada óxido en la mezcla, medida mediante análisis químicos. El primero de ellos es el “factor de saturación de cal” (también LSF, por sus siglas en inglés), que indica el nivel de saturación de cal en la harina, es decir, la cantidad de cal presente en la harina en relación con la cantidad necesaria para formar compuestos en la fase líquida. Este factor proporciona un criterio para determinar la cantidad ideal de óxido de calcio para obtener la cantidad adecuada de silicatos de calcio en el clínker y prevenir la formación de concentraciones elevadas de cal libre, que provocan problemas de expansión en concretos y morteros (Knöfel, 1983).

$$LSF = \frac{100 CaO}{2.8 SiO_2 + 1.1 Al_2O_3 + 0.65 Fe_2O_3}$$

El módulo de sílice es la relación entre la sílice y la suma de la alúmina y el óxido de hierro, que también son conocidos como fundentes. Debido a que, a la temperatura de clinkerización, los fundentes se encuentran en fase líquida y la sílice se encuentra en fase sólida, este módulo describe la relación entre el sólido y el líquido.

$$MS = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3}$$

El módulo de aluminio se determina con la relación entre la alúmina y el óxido de hierro. Este se interpreta como la composición en la fase líquida en el proceso de clinkerización y por lo tanto la viscosidad resultante de dicha fase.

$$MA = \frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3}$$

### 7.1.1.2. Fuentes de azufre, cloro y álcalis en harina cruda

Los álcalis, cloro y azufre se consideran elementos volátiles cuando están presentes en las condiciones específicas de temperatura y presión del horno usado en la clinkerización. Estos elementos ( $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{SO}_3$  y  $\text{Cl}$ ) se presentan, en ciertas concentraciones, dentro de los minerales utilizados para preparar la harina cruda. A continuación, se presentan las principales fuentes de elementos volátiles en la harina cruda (Cortada, 2014).

La fuente principal de álcalis y cloro son los minerales arcillosos. El azufre se origina parcialmente en la arcilla en minerales de hierro como piritita  $\text{FeS}_2$  (Enders & Haeseli, 2011).

#### Tabla 2.

##### *Presencia de azufre, cloro y álcalis en materias primas*

Elemento	Concentración (%m/m) en materia prima		
	Caliza	Arena	Arcilla
$\text{Na}_2\text{O}$	0.0 – 1.5	0.0 – 1.0	0.1 – 1.5
$\text{K}_2\text{O}$	0.0 – 3.5	0.2 – 3.0	0.4 – 5.0
$\text{SO}_3$	0.0 – 0.6	Trazas	0.0 – 1.0
$\text{Cl}$	0.0 – 0.7	0.0 – 0.5	0.21

*Nota.* Concentraciones reportadas de elementos en las materias primas de la harina cruda. Obtenido de Cortada, M. (2014). *Sulfur Release during Alternative Fuels Combustion in Cement Rotary Kilns*. ([https://backend.orbit.dtu.dk/ws/portalfiles/portal/105170251/Maria\\_del\\_Mar\\_Cortada\\_Mut\\_978\\_87\\_93054\\_48\\_6\\_fil\\_fra\\_trykkeri\\_.pdf](https://backend.orbit.dtu.dk/ws/portalfiles/portal/105170251/Maria_del_Mar_Cortada_Mut_978_87_93054_48_6_fil_fra_trykkeri_.pdf)). Consultado el 27 de febrero de 2023. De dominio público.

Los álcalis se derivan principalmente de la materia prima, principalmente de rocas arcillosas. Se han reportado mayores concentraciones de óxidos de sodio y potasio en arcillas y esquistos. Aunque también son fuentes de estas algunas adiciones a la harina cruda como escoria de alto horno (Bhatty, 1995).



### 7.1.2. Clinkerización

El clinker es un mineral sintético que se produce a través de la transformación química de los óxidos presentes en los minerales de la harina, generada en una etapa previa. A esta serie de cambios físicos y químicos se les denomina clinkerización. Durante este proceso, la harina cruda se seca inicialmente, luego se calcina mediante la descarbonatación del carbonato de calcio proveniente de la caliza, se sinteriza a temperaturas entre 1,400 y 1,450 °C y, finalmente, el clinker caliente se enfría a aproximadamente 100 a 200 °C (CEMBUREAU, 1999).

**Tabla 3.**

*Principales componentes del clinker*

Fase mineralógica en clinker	Alita (Silicato tricálcico)	Belita (Silicato bicálcico)	Aluminato tricálcico	Ferritoaluminato tetracálcico
Composición química de la fase pura	$(\text{CaO})_3 \cdot \text{SiO}_2$ C <sub>3</sub> S	$(\text{CaO})_2 \cdot \text{SiO}_2$ C <sub>2</sub> S	$(\text{CaO})_3 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ C <sub>3</sub> A	$(\text{CaO})_4 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ C <sub>4</sub> AF
Color de la fase	Blanca	Blanca	Blanca	Café oscuro
Proporciones en el clinker de cemento (%m/m)	80 – 40	30 – 0	15 – 7	15 – 4

*Nota.* Características de los componentes del clinker. Obtenido de Knöfel, D. (1983). Cement chemistry – cement quality. Consultado el 28 de febrero de 2023.

La alita (C<sub>3</sub>S) generalmente no se encuentra presente en estado puro es el componente más importante del cemento, ya que es responsable principal del desarrollo de resistencias iniciales y buenas resistencias tardías. La fase de la belita (C<sub>2</sub>S) se obtiene en menor proporción para clinker con un bajo factor de saturación de cal. El desarrollo de resistencia de este mineral es más lento y su calor de hidratación es bajo (Knöfel, 1983).

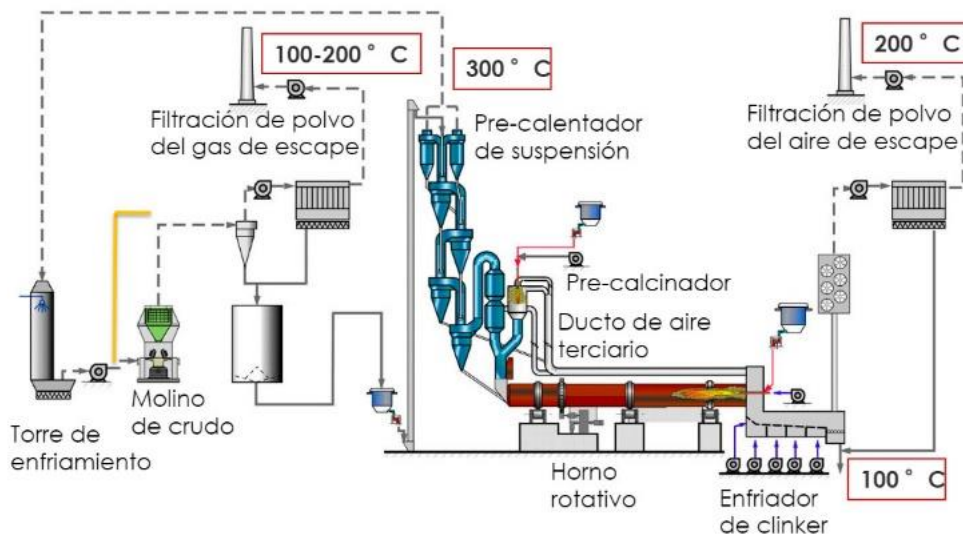
La fase de aluminato tricálcico (C3A) es altamente reactiva y de rápida hidratación, esto da alto calor de hidratación. Por esta razón, También se emplean sulfatos de calcio como retardantes de fraguado para desacelerar la velocidad de esta reacción. También constituye la fase en la que se incorporan óxidos y compuestos de álcalis con composiciones mayores a 5% dentro de esta fase. En combinación con la alita y belita promueve altas resistencias tempranas. La fase de ferrito aluminato tetra cálcico (C4AF) tiene un bajo calor y velocidad de hidratación, junto con el C3A, la alita (C3S) es responsable de la creación de la fase líquida en la sinterización. (Knöfel, 1983).

#### 7.1.2.1. Horno de clinkerización

La clinkerización es un proceso que ocurre dentro de un reactor consistente en un precalentador o pre calcinador, un sistema de enfriamiento.

**Figura 4.**

*Diagrama de horno de clinkerización*



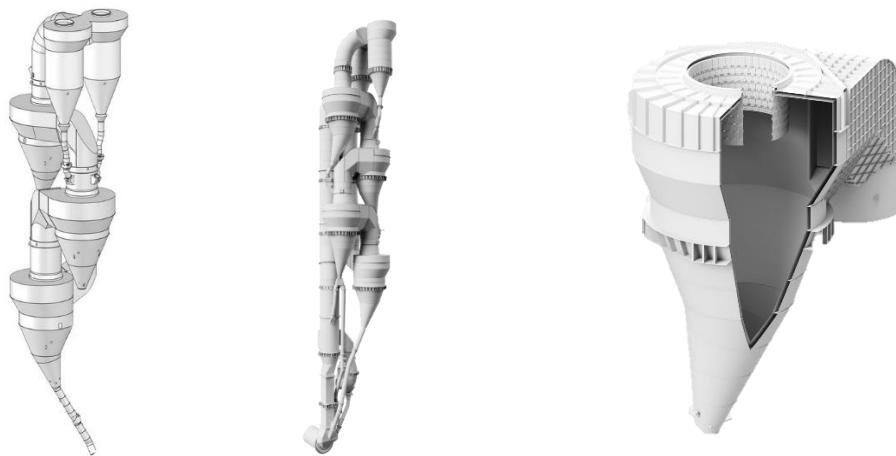
*Nota.* Diagrama de proceso de clinkerización. Termomin (s.f.). *Proceso productivo del cemento.* (<https://termomin.com/cemento/>). Consultado el 1 de marzo de 2023. De dominio público.

### 7.1.2.1.1. Precalentador

Los precalentadores fueron concebidos para elevar la temperatura de la harina cruda hasta el punto en el que comienza la descarbonatación del carbonato de calcio. Además, desempeña la función de separar las corrientes de harina cruda sólida y gases de combustión, lo que favorece la transferencia de calor entre ellos. Durante el desarrollo de los hornos de clinkerización la inclusión de precalentadores disminuyó la longitud del túnel rotatorio. Este equipo consiste en una serie de ciclones interconectados y dispuestos uno sobre otro, de modo que existe un contacto entre la harina cruda, que se alimenta por la parte superior; y los gases de combustión, los cuales ingresan por la parte inferior; que se da por etapas. Se reportan condiciones de operación de temperaturas de gases entrantes aproximada de 1000°C y sale de la torre de ciclones a 350 °C aproximadamente, mientras que la harina se calienta hasta 800 a 850 °C en un precalentador de 4 etapas (Deolakar, 2009).

**Figura 5.**

*Precalentadores y configuraciones de ciclones*



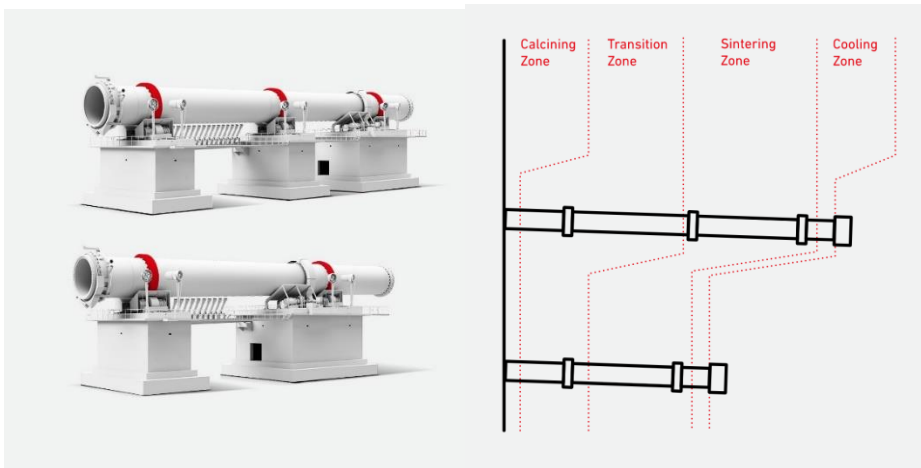
*Nota.* Precalentadores. KHD (s.f.). *Preheater parts.* (<https://www.khd.com/products/pyro/preheater/preheater-parts/#visual-overview>). Consultado el 1 de marzo de 2023. De dominio público.

### 7.1.2.1.2. Horno rotatorio

Consiste en un cilindro rotatorio horizontal recubierto internamente por materiales refractarios, en su interior elevan la temperatura del material hasta el punto de descarbonatación del carbonato de calcio, calentando la cama de material mediante contacto con los gases y la radiación de una llama del quemador principal. La longitud del horno depende de la cantidad de operaciones que deban ocurrir dentro de ellos. En hornos donde el precalentador incluye un calcinador la longitud disminuye.

#### Figura 6.

*Horno rotatorio largo y corto*



*Nota.* Túnel rotatorio. KHD (s.f.). *Rotary Kiln.* (<https://www.khd.com/products/pyro/rotary-kiln/#product-features>). Consultado el 1 de marzo de 2023. De dominio público.

### 7.1.2.1.3. Sistema de enfriamiento

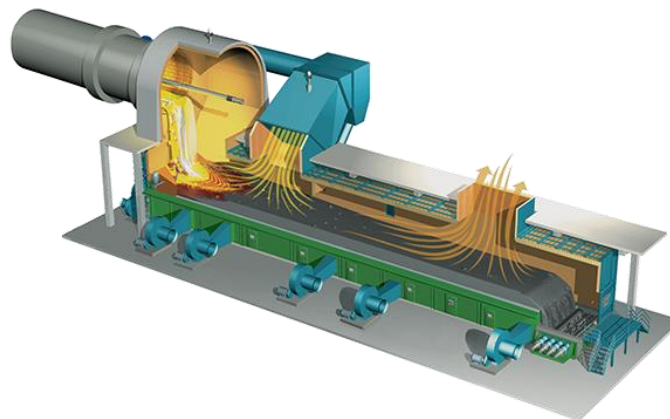
Después de que el clínker es expulsado del horno rotatorio, se encuentra a una temperatura muy alta, alrededor de los 1400-1500°C. Para evitar que el clínker se aglomere o se degrade, es necesario enfriarlo rápidamente. Existen varios tipos de sistemas de enfriamiento de clínker, siendo los más comunes el

enfriador de parrilla y el enfriador rotatorio. En el sistema rotatorio el clinker caliente se distribuye uniformemente en una cámara circular, que está cubierta por un techo de refrigeración en forma de paraguas que gira alrededor del centro de la cámara. La cámara circular está equipada con aletas de enfriamiento radiales, que están montadas en el techo y se extienden hacia el centro de la cámara. El aire frío se sopla a través de las aletas radiales, lo que ayuda a enfriar el clinker a medida que se mueve por la cámara circular (Boateng, 2008).

El enfriador de parrillas móviles se caracteriza por una serie de parrillas móviles dispuestas en una estructura inclinada. A medida que las parrillas se mueven, el clinker se mueve hacia el extremo inferior del enfriador. Utiliza un flujo de aire frío que se mueve en la dirección opuesta a la del clinker, lo que ayuda a enfriar el clinker de manera uniforme. Además, este enfriador dispone de un sistema de recirculación de gases de escape, que ayuda a optimizar la eficiencia del enfriamiento, pasando de una temperatura de aproximadamente 1,400 grados Celsius a una temperatura de aproximadamente 100°C (Deolakar, 2009).

### **Figura 7.**

*Enfriador de parrillas móviles*



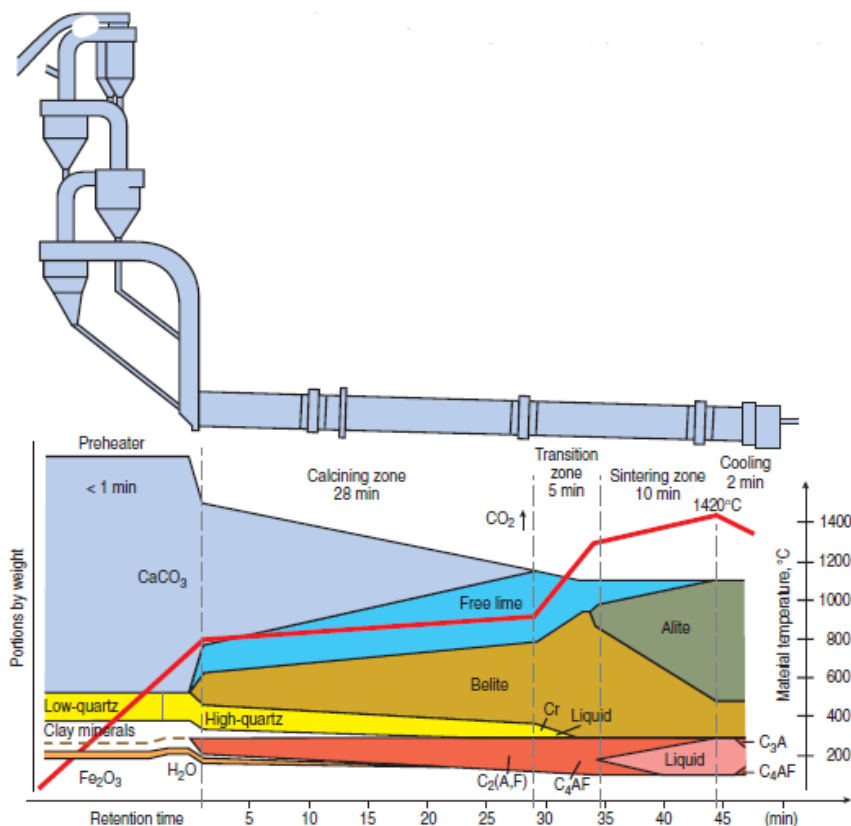
*Nota.* Esquema de proceso de enfriamiento. Claudius Peters (s.f.). *Clinker coolers*. (<https://www.claudiuspeters.com/en-GB/298/clauidius-peters-clinker-cooling-technology>). Consultado el 1 de marzo de 2023. De dominio público.

### 7.1.2.2. Etapas físicas y químicas

El clinker se produce mediante una secuencia de reacciones químicas que ocurren dentro del sistema del horno. En la longitud sistema la materia se calienta, pasando a por medio de un rango de temperaturas desde 200 hasta 1450 °C. Los procesos fisicoquímicos que ocurren en este rango se pueden clasificar como reacciones por debajo de los 1300 °C, reacciones entre los 1300 a 1450°C y reacciones durante el enfriamiento (Taylor, 1997)

**Figura 8.**

*Química del proceso de clinkerización*



*Nota.* Diagrama de reacciones de clinkerización. Glasser, F (2004). *Transformation of raw meal to clinker products during cement manufacturing.* The red line (right hand scale) shows the temperature profile. (<https://acortar.link/V4R1xn>). Consultado el 1 de marzo de 2023. De dominio público.

#### 7.1.2.2.1. Reacciones inferiores a 1300 °C

El secado de la harina cruda consiste en evaporar el agua libre contenida en la harina cruda, este se da desde la entrada al precalentador hasta los 200 °C. Posteriormente el agua ligada al mineral por adsorción se elimina a través del deshidratado de minerales arcillosos entre los 100 y 400 °C. Estos dos fenómenos son físicos, en los que únicamente hay un cambio de estado del agua (Knöfel, 1983). Entre los 400 y 750 °C ocurre una reacción de deshidroxilación de minerales contenidos en las arcillas como por ejemplo el caolín a meta caolín y una posterior descomposición de los óxidos del meta caolín a 900 °C (Enders & Haeseli, 2011).

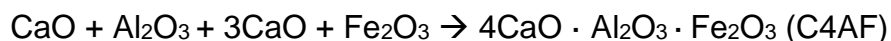
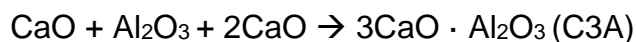


La descomposición de carbonatos ocurre en la calcinación del carbonato de calcio contenido en la caliza. El fenómeno comienza a ocurrir aproximadamente entre 500 y 600 °C y las condiciones de equilibrio de esta reacción ocurren a 1 atm a 894 °C aproximadamente



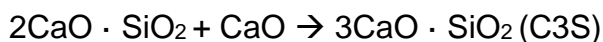
En la duración de la formación de CaO ocurren reacciones simultáneas para formación de CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (CA) y de CaO·SiO<sub>2</sub> (CS). Cuando las fuentes de materias primas incluyen dolomita, existen por debajo de las temperaturas de esta reacción la descarbonatación del carbonato de magnesio que da como productos óxidos de magnesio y dióxido de carbono (Taylor, 1997).

Posteriormente continúan ocurriendo reacciones en estado sólido a partir de los 800 °C, estas son la producción de silicato bicálcico, que comienza a formarse a temperaturas más bajas; de aluminato tricálcico; y ferrito aluminato tetra cálcico. Debido a que son reacciones que ocurren en estado sólido influyen en la velocidad de reacción el tamaño de partícula y la temperatura de la zona de fuego en el horno (Knöfel, 1983).



#### **7.1.2.2.2. Reacciones entre 1300 y 1450 °C**

En este rango de temperaturas se forma una fase líquida al derretir los minerales del C4AF, C3A y una parte pequeña de la belita C2S (Taylor, 1997). A la región del horno donde ocurre se le llama sinterización y es donde ocurre principalmente la formación de la fase de alita C3S. El mecanismo de formación consiste en la disolución del CaO y C2S en la fase líquida y la formación de C3S dentro de esta (Knöfel, 1983).



#### **7.1.2.2.3. Reacciones durante el enfriamiento**

La aparición de C3S ocurre en una reacción reversible. Esto implica que, si la temperatura disminuye muy lentamente, puede disminuir la concentración de C3S creado en la zona de sinterización. Por ello se busca que el enfriamiento ocurra de forma rápida, para causar una cristalización rápida de los elementos y que el equilibrio se congele en el estado en el que se encuentra a 1450°C. Otros



fenómenos que ocurren en este proceso es una mejora en la molturabilidad del clínker debido al estrés térmico generado por el cambio de temperatura

## **7.2. Combustión industrial**

La combustión industrial es un proceso vital para numerosas industrias que necesitan calentar, secar o fundir materiales. La combustión es una reacción química que comienza cuando un combustible, como gas natural, petróleo, carbón o biomasa, se combina con un oxidante, como el oxígeno presente en el aire. Esta reacción produce calor, CO<sub>2</sub> y agua. La combustión industrial se utiliza en diversas aplicaciones, desde la generación de energía hasta la fabricación de materiales como vidrio, acero, cemento y cerámica.

Durante la clinkerización, la combustión industrial se utiliza para proporcionar el calor necesario para la reacción química que transforma la materia prima en clínker. Los combustibles más comunes utilizados en la clinkerización son el carbón, el petróleo y el gas natural. La eficiencia de combustión es un factor crucial en la fabricación del clínker, ya que se relaciona directamente con el rendimiento energético. Se define como la cantidad de energía que se produce a través de la combustión del combustible en relación con la energía que se consume. Una combustión ineficiente puede generar una serie de problemas, como la formación de depósitos de carbón y ceniza, la producción de gases contaminantes y la pérdida de energía. Por lo tanto, la optimización de la combustión es esencial para maximizar la eficiencia energética y minimizar las emisiones contaminantes en la producción de clínker y cemento (Boateng, 2008).

En la actualidad, existe una creciente tendencia en la industria del cemento hacia la utilización de AFR (alternative fuels and raw materials), es decir, combustibles y materias primas alternativas a los tradicionales, como el carbón y

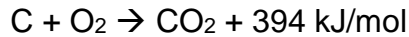
la piedra caliza. Los AFR pueden ser residuos industriales, neumáticos usados, lodos de depuradora, biomasa, entre otros, que son valorizados como combustibles y/o materias primas en la clinkerización. La utilización de AFR puede reducir la dependencia de combustibles fósiles y disminuir la cantidad de residuos que se envían a vertedero, lo que puede mejorar la sostenibilidad ambiental y social de la industria del cemento (Holcim, 2019).

Sin embargo, la utilización de AFR también puede presentar desafíos en términos de la optimización de la combustión y la calidad del clínker producido. Por ejemplo, algunos AFR pueden contener componentes que afectan negativamente a la calidad del clínker, como metales pesados o cloro. Además, la utilización de AFR puede requerir ajustes en los procesos de combustión y en la tecnología de los hornos para garantizar una combustión eficiente y reducir las emisiones contaminantes. Por lo tanto, es importante realizar un análisis exhaustivo de la calidad de los AFR y de los impactos en los procesos de clinkerización antes de su implementación (GTZ-Holcim Public Private Partnership).

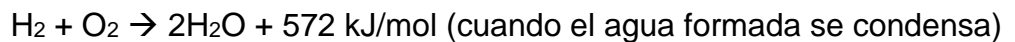
### **7.2.1. Reacciones químicas en la combustión**

Los combustibles industriales son caracterizados por estar compuestos, en su mayor parte, por carbono e hidrógeno. Las reacciones de combustión características de los combustibles se definen como el sistema simple de reacciones químicas, que se resume a continuación (Mullinger y Salkield, 2023).

La primera reacción es la oxidación completa del carbón, aunque en la práctica, la obtención de dióxido de carbono también es el resultado posterior a la etapa de formación de monóxido de carbono.



La reacción de oxidación completa del hidrógeno consiste en la oxidación del hidrógeno molecular y formación de agua como producto de combustión. La razón de oxidación del hidrógeno es mayor a la del carbón debido a la afinidad con el oxígeno disponible en la mezcla de aire y combustible.



La reacción incompleta del carbono ocurre debido a que no todo el carbono presente en el combustible alcanza a oxidarse completamente, sino que lo hace de forma parcial para dar lugar a la formación monóxido de carbono. Una consecuencia de la presencia de esta reacción es que no toda la energía de la combustión completa es liberada. Solo una fracción, aproximadamente la mitad se obtiene de esta reacción.



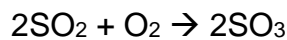
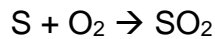
La oxidación del monóxido de carbono ocurre por medio de una reacción reversible en la que el CO formado es llevado al estado de CO<sub>2</sub> (Mullinger & Salkield, 2023).



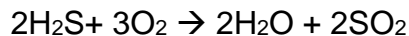
#### **7.2.1.1. Oxidación del azufre**

Los combustibles pueden contener azufre en formas como grupos funcionales de compuestos orgánicos, pirita y gas H<sub>2</sub>S. Indistintamente de la

Fuente, los productos de la oxidación del azufre son óxidos SO<sub>2</sub> y SO<sub>3</sub>. La última especie mencionada tiene una menor presencia en general, pero se encuentra en concentraciones significativas cuando el aire de exceso es alto (Spörl et al., 2013).

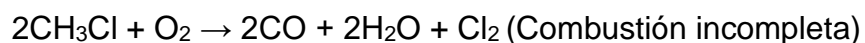
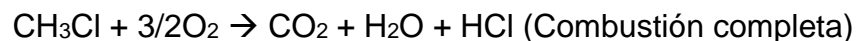


La operación de los hornos se da con un nivel moderado de aire en exceso, por lo que la especie dominante es el SO<sub>2</sub>. Esta especie es corrosiva y causa problemas en las estructuras metálicas y en el material refractario en las áreas de menor temperatura en el sistema del horno. El SO<sub>3</sub> tiene efectos mas corrosivos y en combinación con el agua de combustión da lugar a la formación de ácido sulfúrico (Mullinger & Salkield, 2023).



#### **7.2.1.2. Reacciones del cloro en la combustión**

En reacciones de combustión donde existe cloro en el combustible existe una competencia entre el oxígeno y el cloro por el hidrógeno disponible para dar lugar a la formación de H<sub>2</sub>O y HCl. Los productos de la combustión completa de la alimentación clorada en el combustible son el ácido clorhídrico y dióxido de carbono. Aunque en los procesos reales de combustión se han encontrado productos de combustión incompleta como Cl<sub>2</sub> (Pocaccini, 1999).

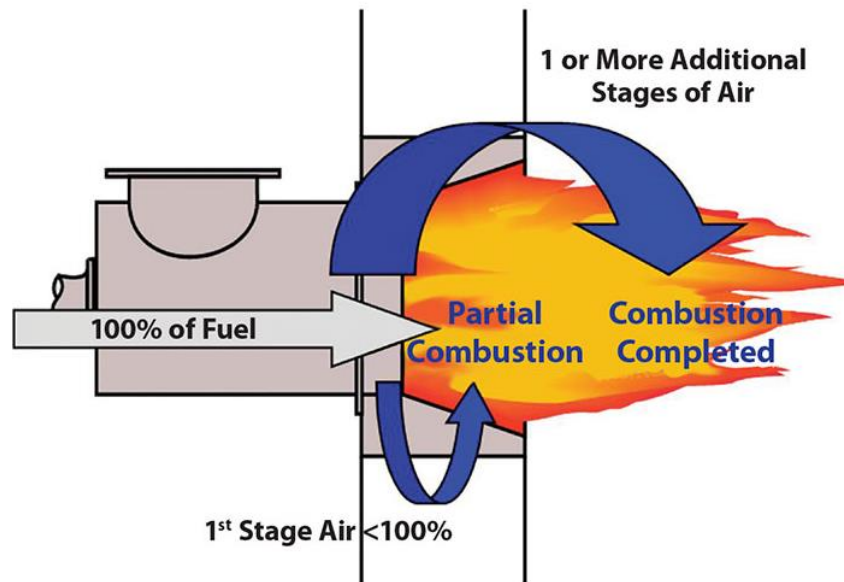


### 7.2.2. Elementos de la combustión

Castillo describe tres elementos fundamentales para los procesos de combustión industrial. Dos de ellos son insumos de proceso y uno es el equipo utilizado para la combustión: combustible, comburente y el quemador.

**Figura 9.**

*Distribución de los elementos de la combustión industrial.*



*Nota.* Elementos de la operación unitaria de combustión. Checkeye, J. & Valancius, M. (2016). *Industrial Process Burners: Understanding Industrial Burners*. (<https://www.process-heating.com/articles/91420-understanding-industrial-burners>). Consultado el 5 de marzo de 2023. De dominio público.

El combustible es una sustancia que se quema en presencia de un oxidante para producir energía. En la combustión industrial, los combustibles suelen ser líquidos, sólidos o gaseosos, como el petróleo, el gas natural, el carbón, la biomasa o los residuos. El tipo de combustible depende de varios factores, como el costo, la disponibilidad, la calidad y la eficiencia. El comburente es una sustancia que proporciona oxígeno para la combustión. En la mayoría de

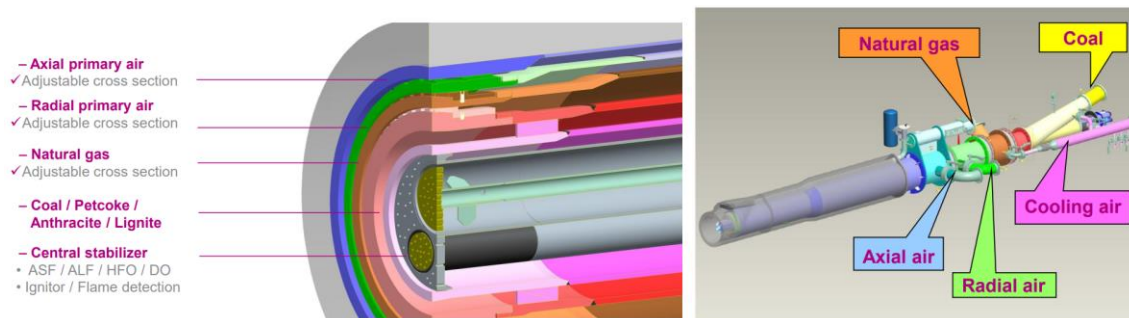
los casos, el comburente es el aire, que contiene alrededor del 21% de oxígeno. El quemador es responsable de preparar y mezclar el combustible y el comburente para su combustión, y de introducir esta mezcla en el reactor o horno donde se produce el proceso correspondiente (Castillo, 2011).

### 7.2.2.1. Quemadores utilizados en hornos rotatorios

En la actualidad se ha hecho de uso universal el uso de quemadores con múltiples canales para la dosificación y mezcla de aire y combustibles. La ventaja de este tipo de quemadores es la posibilidad de modificar la forma e intensidad de la llama, así como la capacidad de suministrar combustibles líquidos, sólidos y gaseosos en los canales respectivos (Chatterjee, 2018).

**Figura 10.**

*Quemador con canales múltiples*



*Nota.* Elementos de un quemador industrial. Tater, E. (2019). *Fives Pillard – Rotary Kiln Burner*. (<https://www.tappi.org/content/Events/19PEERS/19PEE76.pdf>). Consultado el 10 de marzo de 2023. De dominio público.

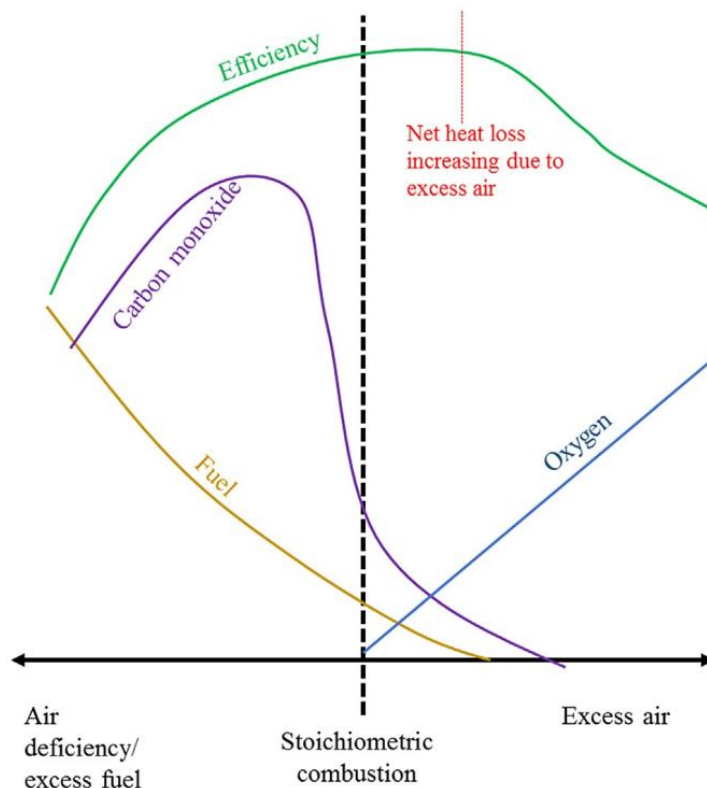
Los objetivos que se cumplen a partir del quemador utilizado son asegurar que las proporciones correctas de aire primario y combustible sean suministradas y que se logre un máximo contacto entre ellos por medio de una mezcla uniforme y permanente y de esta forma lograr una combustión autosostenida (Castillo, 2011).

### 7.2.2.2. Aire de combustión

En el proceso de clinkerización, el aire es un factor crítico para garantizar una combustión eficiente y completa. La presencia de oxígeno en el aire de combustión es necesaria para que la reacción de combustión se lleve a cabo, y para asegurar que se produzcan altas temperaturas en el horno. Sin embargo, es importante mantener un equilibrio adecuado de oxígeno en el aire de combustión, ya que un exceso de oxígeno puede llevar a una combustión incompleta (Castillo, 2011).

**Figura 11.**

*Relación entre el aire en exceso y la eficiencia*



*Nota.* Eficiencia de combustión. Vallero, D. (2019). *Air-fuel ratio's effect on combustion efficiency and generation of carbon monoxide*. (<https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/combustion-efficiency>). Consultado el 10 de marzo de 2023. De dominio público.

El exceso de oxígeno también puede disminuir la eficiencia de la reacción de combustión, esto puede tener un impacto negativo en la economía y la sostenibilidad del proceso. La eficiencia generalmente aumenta con el porcentaje de aire en exceso, hasta un punto en el que la pérdida de calor en el aire de exceso ocasiona que esta comience a disminuir (Vallero, 2019).

### **7.2.3. Combustibles industriales**

Los combustibles utilizados en los hornos de clínker son un factor importante por considerar en la producción de clínker, ya que tienen un impacto significativo en el costo y la sostenibilidad del proceso. Los combustibles comúnmente utilizados incluyen carbón, coque de petróleo, gas natural, biomasa y combustibles alternativos derivados de residuos, como neumáticos usados y aceite de desecho. La selección del combustible depende de varios factores, como el costo y la disponibilidad del combustible, la eficiencia de la reacción de combustión, las liberación o producción de gases contaminantes y la calidad del clínker producido.

Por ejemplo, algunos combustibles pueden tener un costo inicial más alto, pero su eficiencia energética puede ser mayor, lo que puede resultar en costos de producción más bajos a largo plazo. La disponibilidad y la estabilidad del suministro de combustible también son factores críticos por considerar, ya que una interrupción en el suministro puede interrumpir la producción de clínker y tener un impacto en la economía del proceso (Mullinger & Salkield, 2023).

Además, se deben considerar la liberación de gases de efecto invernadero y otros gases contaminantes generados durante la combustión del combustible, y se deben tomar medidas para minimizar su repercusión en el entorno. Algunos combustibles alternativos pueden ser menos contaminantes que los combustibles



tradicionales, lo que puede resultar en una disminución de las emisiones y avances en la sostenibilidad del proceso.

Por último, la elección del combustible también puede impactar la calidad del clínker producido, ya que la composición del combustible puede influir en la composición del clínker. Por lo tanto, debe considerarse cuidadosamente la selección del combustible y monitorear constantemente la calidad del clínker producido para asegurar el cumplimiento de las especificaciones necesarias para su uso en la manufactura de cemento (Mullinger & Salkield, 2023).

#### **7.2.3.1. Combustibles alternos, AFR´s**

Los combustibles alternativos son una forma de reducir el uso de combustibles fósiles en la producción de cemento. Estos combustibles se utilizan en lugar de los combustibles fósiles tradicionales, como el carbón y el petróleo, y pueden ser materiales residuales o subproductos de otras industrias, como residuos municipales, lodos de depuradoras, aceites usados, neumáticos usados y residuos de madera. El uso de AFR´s en la producción de cemento puede tener beneficios económicos y de sostenibilidad, ya que los residuos que de otra manera se desecharían pueden ser utilizados como una fuente de energía renovable.

De tal forma, el uso de combustibles alternativos también puede impactar positivamente en el medio ambiente al reducir la liberación de gases de efecto invernadero y otros contaminantes generados durante la producción de cemento. Al utilizar materiales residuales como combustibles. Además, la producción de cemento utilizando combustibles alternativos puede contribuir a la conservación de los recursos naturales al reducir la necesidad de extraer combustibles fósiles (Holcim, 2019).

### 7.2.3.2. Tipos de AFR´s

Los combustibles alternos provienen de desechos que pueden ser clasificados como biológicos y no biológicos. En la primera clasificación se encuentran los materiales orgánicos provenientes de plantas, animales y microorganismos, estos pueden ser producto de la descomposición de dichos materiales. En la segunda clasificación se tiene su origen en desechos resultantes de la actividad de otros procesos industriales compuestos de sustancias combustibles, pero que no tengan origen biológico (Chaterjee, 2018).

**Tabla 4.**

*Residuos relevantes usados como AFR´s*

Tipo de AFR	Ejemplos	Descripción
Desechos sólidos municipales	Residuos sólidos municipales clasificados /seleccionados	Residuos sólidos urbanos que han sido sometidos a un proceso de clasificación y separación en diferentes categorías (como plásticos, metales, papel, vidrio, etc.)
	Residuos sólidos municipales secados	Residuos sólidos urbanos que han sido sometidos a un proceso de secado para reducir su contenido de humedad antes de ser procesados o eliminados.
Desechos industriales peligrosos	Petróleo y gas	Recursos naturales no renovables ampliamente utilizados como combustibles
	Químicos	residuos líquidos que contienen compuestos químicos combustibles.
	Líquidos	pueden incluir aceites usados, disolventes, lodos de aguas residuales, entre otros, que son tratados y transformados en un combustible líquido
	Residuos farmacéuticos	residuos farmacéuticos, como medicamentos vencidos, no utilizados o caducados
	Residuos del sector automotriz	Generados por la industria automotriz como alternativa a los combustibles convencionales neumáticos usados, aceites de motor usados, filtros de aire y aceite

Continuación de la tabla 2. *Residuos relevantes usados como AFR's*

<b>Tipo de AFR</b>	<b>Ejemplos</b>	<b>Descripción</b>
Desechos industriales no peligrosos	Rechazos comerciales	Materiales sobrantes o desechados que se generan durante la fabricación o distribución de productos comerciales
	Envases y embalajes	Los envases y embalajes se pueden utilizar como AFR
	Neumáticos	Los neumáticos se pueden utilizar como AFR
	Destrucciones fiscales	Destrucción de bienes o productos que están en exceso de producción, para evitar que se acumulen en los almacenes o para cumplir con ciertas regulaciones fiscales.
Residuos de biomasa	Bagazo, semillas madera, etc.	Materiales orgánicos derivados de plantas y animales, como la madera, las hojas, los cultivos agrícolas, los desechos de alimentos y los residuos de animales.

*Nota.* Tipos de combustibles alternos utilizados para el coproceso en el proceso de clinkerización. Holcim. (2019). *Guidelines on Pre- and Co-processing*. ([https://www.giz.de/en/downloads/giz-2020\\_en\\_guidelines-pre-coprocessing.pdf](https://www.giz.de/en/downloads/giz-2020_en_guidelines-pre-coprocessing.pdf)). Consultado el 11 de marzo de 2023. De dominio público.

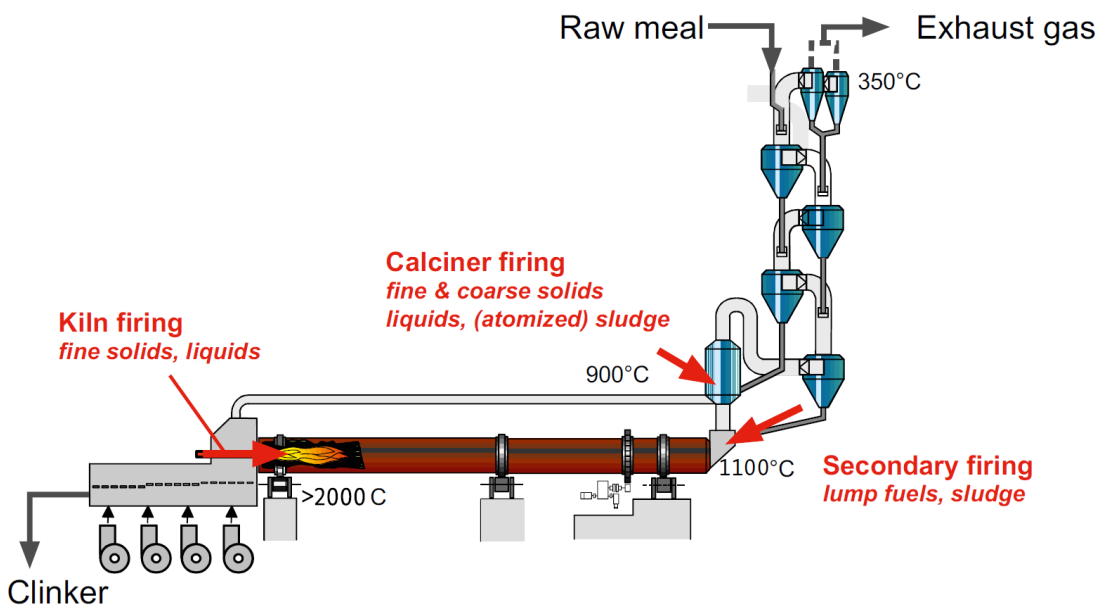
### **7.2.3.3. Uso de AFR's en hornos de clinkerización**

La utilización de combustibles alternativos (AFR) en los hornos de clínker presenta varias consideraciones y especificaciones se debe considerar para garantizar una operación segura y eficiente. En primer lugar, es importante que los AFR sigan las especificaciones de calidad y seguridad necesarias para su uso en la industria del cemento. Estas deben incluir parámetros como el contenido de humedad, el poder calorífico, el contenido de cenizas y la aparición de contaminantes (Chaterjee, 2018).

Además, se deben realizar pruebas de compatibilidad para garantizar que los AFR no afecten negativamente la calidad del clínker o la operación del horno. Las pruebas de compatibilidad pueden incluir análisis de cenizas y gases, así como mediciones de la eficiencia y la temperatura de la combustión.

### Figura 12.

*Puntos de alimentación recomendados para AFR's*



*Nota.* Tipos de combustibles alternos utilizados para el coproceso en el proceso de clinkerización. Holcim. (2019). *Guidelines on Pre- and Co-processing*. ([https://www.giz.de/en/downloads/giz-2020\\_en\\_guidelines-pre-coprocessing.pdf](https://www.giz.de/en/downloads/giz-2020_en_guidelines-pre-coprocessing.pdf)). Consultado el 11 de marzo de 2023. De dominio público.

También es fundamental tener un sistema de almacenamiento y manipulación adecuado para los AFR, con medidas de seguridad para prevenir riesgos de explosiones y emisiones de gases tóxicos. Se deben tener en cuenta los requisitos de espacio, ventilación y protección contra incendios al diseñar el sistema de almacenamiento y manipulación (Holcim, 2019).

Finalmente, la utilización de AFR puede requerir ajustes en la operación del horno y en el proceso de manufactura del clínker. Es importante contar con un equipo de expertos que supervise el proceso y realice las modificaciones necesarias para garantizar un rendimiento óptimo del horno y la calidad del clínker producido. En resumen, para garantizar una operación segura y eficiente, es necesario considerar y cumplir con las pautas de calidad y seguridad de los AFR, realizar pruebas de compatibilidad, contar con un sistema de almacenamiento y manipulación adecuado y tener un equipo de expertos que supervise y ajuste el proceso de manufactura del clínker (GTZ-Holcim Public Private Partnership, 2006).

#### **7.2.3.4. Consideraciones para el proceso de clinkerización por el uso de AFR's**

La sustitución de combustibles convencionales por alternos en el proceso ha llevado al interés por controlar ciertos fenómenos que pueden afectar el proceso de clinkerización denominados como desafíos de proceso y calidad. Se puede presentar desafíos en términos de control de la combustión, calidad del clínker, almacenamiento y manejo y cumplimiento de regulaciones. Sin embargo, estos desafíos pueden abordarse mediante pruebas exhaustivas, ajustes en la operación del horno y medidas de seguridad adecuadas, lo que permite el uso seguro y sostenible de los AFR en la producción de cemento (Chatterjee, 2018).

El uso de AFR en el proceso de clinkerización a menudo plantea desafíos en el control de la dosificación. Debido a la variabilidad inherente de los residuos, puede ser difícil mantener un flujo constante y uniforme de combustible hacia el horno. Esta falta de control en la dosificación puede llevar a un aumento en el volumen de gases producidos por un bajo poder calorífico y una reducción en la eficiencia energética del proceso.

El uso de combustibles alternativos en el proceso de clinkerización puede llevar a la introducción de compuestos volátiles, como el cloro y el azufre, en el sistema. puede tener un efecto negativo en la calidad del clínker producido. Existe la posibilidad de que el cloro reaccione con los álcalis presentes en la materia prima para formar cloruros alcalinos, que pueden causar problemas de corrosión en el horno y en los equipos relacionados. Además, los cloruros alcalinos pueden provocar problemas de incrustaciones en los sistemas de precalentamiento y en los ciclones (Holcim, 2019).

### **7.3. Ciclos de recirculación en el proceso de clinkerización**

Ciertos compuestos formados por álcalis, cloro y azufre pueden ser volatilizados dentro del horno debido a las condiciones de altas temperaturas que ocurren dentro del sistema. Debido a que la circulación de gases y sólidos dentro del horno es a contracorriente la volatilización en las zonas calientes y condensación en las zonas frías ocasiona que estas sustancias formen parte de un ciclo de acumulación de material (Enders & Haeseli, 2011; Cortada et al., 2015).

#### **7.3.1. Afinidad de elementos en circulación**

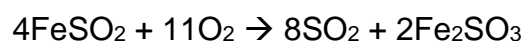
Cortada definió el orden de afinidad para formación de especies químicas basadas en los elementos circulantes de cloro, azufre y álcalis. Conocer estas relaciones de afinidad tiene su importancia ya que cada especie tiene un comportamiento de volatilidad diferente y se puede conocer el grado de acumulación que se tendrá a partir de balances de materia realizados en condiciones de operación normal en el día a día. De esta forma se puede identificar problemas de incrustaciones altas en el caso de tener mucha acumulación de volátiles que se evaporan por completo en la zona de fuego o

problemas de calidad en clínker en el caso de volátiles que se evaporan parcialmente en la zona de fuego (Cortada, 2014).

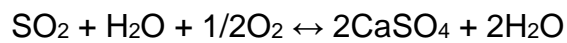
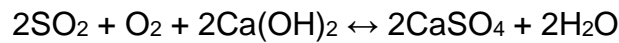
- El cloro reacciona primeramente con álcalis, formando KCl y/o NaCl, típicamente en la fase gaseosa. El cloro residual se combina con calcio, formando  $\text{CaCl}_2$  (s/l). Sin embargo, es raro que la entrada de cloro sea más alta que la de álcalis.
- El exceso de álcalis reacciona con el azufre, formando  $\text{K}_2\text{SO}_4$  y/o  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  en las fases sólida o líquida. Los álcalis residuales se combinan con  $\text{CO}_2$ , formando  $\text{K}_2\text{CO}_3$  y  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ; o con la humedad, formando NaOH y KOH en la fase gaseosa. Los álcalis también pueden ser incorporados en los minerales del clínker.
- El exceso de azufre presente como  $\text{SO}_3$  y/o  $\text{SO}_2$  en el gas reaccionará con el CaO (s), formando  $\text{CaSO}_4$  (s). (Cortada, 2014, p.40)

### **7.3.2. Mecanismos de reacción físicos y químicos**

Por debajo de los 800 °C, a la temperatura de des hidroxilación de los minerales de la arcilla, también ocurre el fenómeno de oxidación de la pirita  $\text{FeS}_2$ . Esta se ubica en las primeras etapas del precalentador de ciclones. Se ha reportado que entre un 30% y 50% del  $\text{SO}_2$  liberado en esta reacción deja el precalentador como gases de escape y el resto será integrado a la corriente de harina cruda de la alimentación (Cortada, 2014).



Se ha estudiado que el SO<sub>2</sub> liberado por los minerales de la harina cruda suben con los gases emitidos de escape y reaccionan con la humedad y generar ácido sulfúrico, el cual es altamente corrosivo. para estructuras metálicas y material de revestimiento refractario. Mientras que la proporción que es integrada a la corriente sólida lo hace por medio de la reacción con hidróxido de calcio, especialmente en ambientes con alta humedad para formar CaSO<sub>4</sub>. Otro de los mecanismos de absorción de SO<sub>2</sub> en la corriente de harina es la reacción con el óxido de calcio proveniente de la harina. A temperaturas por debajo de 850 °C en las últimas etapas del precalentador lo hace por la vía de formación de CaSO<sub>3</sub> y por arriba de esa temperatura por la vía de formación de SO<sub>3</sub>, en ambos casos la ecuación global es la misma (Cortada et al., 2015; Enders & Haeseli, 2011).



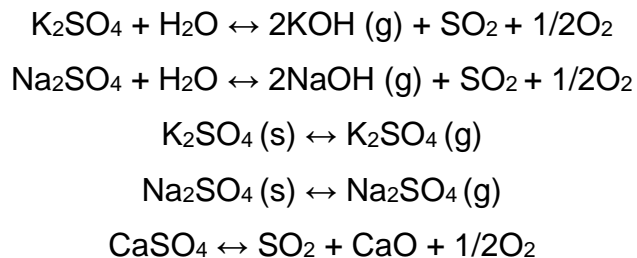
A partir de los 800 grados tiene lugar la reacción física de condensación y volatilización de los cloruros de álcalis KCl y NaCl. Se ha reportado que el rango de temperaturas donde existe variaciones significativas de estas especies en la fase líquida y sólida es de 800°C a 1200 °C, entre la zona de calcinación y de transición. La formación de estos elementos se discutirá en la sección de reacciones que ocurren en la zona de sinterización.

Por arriba de los 1200 °C ubicado dentro de la zona de transición y de sinterización tienen lugar las reacciones de formación de cloruros y sulfatos alcalinos. Los sulfatos alcalinos, principalmente K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> y Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, son menos volátiles que los cloruros alcalinos. Durante el proceso de sinterización, entre el 80 y el 95% de los sulfatos alcalinos pueden atravesar la zona sin descomponerse. Esta característica es esencial, ya que permite que los sulfatos



alcalinos contribuyan a la formación de clínker y, al mismo tiempo, evita la acumulación de compuestos indeseables en el sistema.

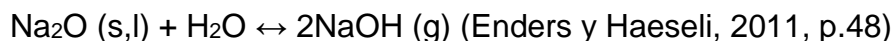
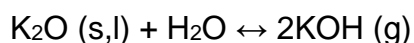
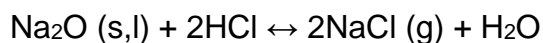
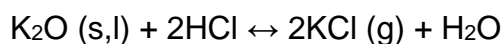
A medida que aumenta la temperatura de la sección de sinterización, los sólidos de sulfato alcalino comienzan a descomponerse. A partir de los 1350°C, las concentraciones de  $K_2SO_4(S)$  y  $Na_2SO_4(S)$  disminuyen, liberando agua en forma gaseosa ( $H_2O$ ) y aumentando la presión parcial de  $SO_2$  en el proceso. Los productos resultantes de esta descomposición incluyen hidróxidos de alcalinos. Además, en la sección de sinterización ocurre la descomposición del  $CaSO_4$  promovida por las altas temperaturas, dos productos importantes de esta reacción es  $SO_2$  y  $CaO$  (Enders & Haeseli, 2011).



Enders y Hawseli informaron, se observó la creación de cloruros e hidróxidos alcalinos que participan en los ciclos de condensación y volatilización en las etapas previamente discutidas ocurre en la sección de sinterización donde los óxidos alcalinos reaccionan con los iones cloruro e hidroxilo presentes en el gas de  $HCl$  y  $H_2O$ .

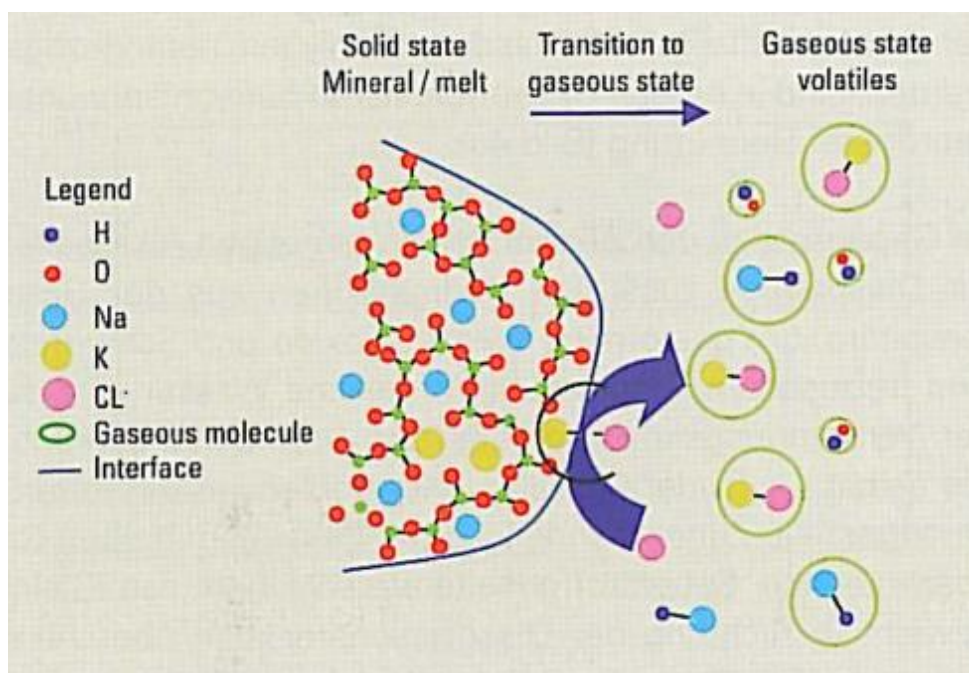
Esta transferencia desde los minerales silicatados/fundidos a la atmósfera gaseosa está controlada por (I) la difusión de los álcalis dentro del cristal/fundido, (II) la energía en exceso necesaria para pasar de la interfaz del estado sólido/fundido al estado gaseoso, (III) y la disponibilidad de

aniones en la atmósfera gaseosa para formar especies volátiles. Los álcalis sólo pueden ser vaporizados si se proporcionan parejas de reacción a partir de los gases de combustión. Los aniones de cloro e hidroxilo en los gases de combustión sirven como socios de reacción para formar especies volátiles (elementos portadores).



**Figura 13.**

*Representación de la transferencia de álcalis a la atmósfera gaseosa del horno*



*Nota.* Transferencia de álcalis en la zona de sinterización. Enders M. & Haeseli U. (2011). *Reactions of alkalis, chlorine and sulfur during clinker production.* ([https://www.researchgate.net/publication/286972674\\_Reactions\\_of\\_alkalis\\_chlorine\\_and\\_sulfur\\_during\\_clinker\\_production](https://www.researchgate.net/publication/286972674_Reactions_of_alkalis_chlorine_and_sulfur_during_clinker_production)). Consultado el 20 de marzo de 2023. De dominio público.

### 7.3.3. Problemas derivados de los ciclos de recirculación

**Tabla 5.**

*Influencia de elementos volátiles en el proceso*

Efecto en el proceso	Fases	Métodos de control	Aclaraciones
Obstrucciones del precalentador	CaSO <sub>4</sub> y CaSO <sub>3</sub> secundario, KCl, K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , 2CaSO <sub>4</sub> .K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (Ca-Langbeinita), 2C <sub>2</sub> S.CaCO <sub>3</sub> (Espurríta), 2C <sub>2</sub> S.CaSO <sub>4</sub> (Sulfoespurríta).	Operación del horno de acuerdo con la relación molar de SO <sub>3</sub> y óxidos de álcalis, limitando las entradas de Cl	Se ha determinado que el cloro es un promotor de la formación de espurríta
Cambio en las propiedades de la fase líquida en la zona de fuego	Radicales disociados y cationes que alteran la viscosidad y tensión superficial de la fase líquida; SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> en ausencia de Na <sup>+</sup> y K <sup>+</sup> disminuyen "la viscosidad de la fase líquida."	Ajustar la relación molar de azufre/álcalis; optimizando el contenido de magnesio en el sistema	Se ha reportado que el flúor también tiene un efecto significativo en las propiedades de la fase líquida.
Modificación de la "composición de las fases del clínker en" un entorno rico en álcalis	Na <sub>2</sub> O.8CaO.3Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> con alto contenido de Na <sub>2</sub> O en el sistema; Aparición de K <sub>2</sub> O-23CaO-12SiO <sub>2</sub> en la presencia de K <sub>2</sub> O.	Reducción de las entradas de álcalis.	El cálculo de los módulos de las fases de clínker debe ser corregida para la incorporación de álcalis.
Modificación de la "composición de las fases del clínker en presencia de álcalis y sulfatos".	Formación de Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> y K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .	Ajustar la relación molar de azufre/álcalis	En composiciones con menos moles de SO <sub>3</sub> respecto a los óxidos de álcalis, se forman primero los sulfatos de álcalis y luego un exceso de los óxidos reaccionan para formar compuestos con C <sub>3</sub> A y C <sub>2</sub> S.
Penetración de elementos volátiles en el revestimiento refractario	Deposición de sulfatos y sulfuros en las partes centrales frías del ladrillo refractario de magnesio.	Monitorear el espesor del revestimiento	En ladrillos de dolomita se forma CaS y CaCO <sub>3</sub> .

*Nota.* Efectos de la acumulación de elementos volátiles. Adaptado de Chatterjee, A. & Sui, T. (2019). Alternative fuels – Effects on clinker process and properties. *Cement and Concrete Research*. 123, 105777, p. 1. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105777>

### **7.3.3.1. Formación de revestimiento y anillos en el horno rotatorio**

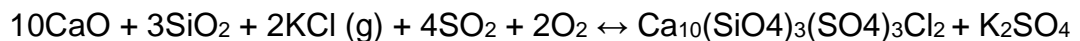
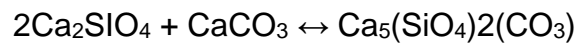
Los revestimientos se forman debido a la deposición y solidificación de compuestos líquidos o semilíquidos en las paredes internas del horno rotativo. Estos compuestos pueden incluir “silicatos, aluminatos y ferritos, que se forman a partir de la fusión parcial de las materias primas durante el proceso de clinkerización. El revestimiento puede afectar la transferencia de calor dentro del horno”, disminuyendo así el desempeño del proceso. Además, el revestimiento irregular puede provocar desgaste mecánico en el horno rotativo y aumentar los costos de mantenimiento (Cortada, 2014).

La formación de anillos se refiere a la acumulación de material sólido en forma de anillo a lo largo del horno rotativo. Los anillos pueden ser rígidos o sueltos y, a menudo, están compuestos por compuestos de calcio, silicio, aluminio, hierro y otros elementos presentes en las materias primas. Estos anillos pueden obstruir el flujo de material y gas en el horno, reduciendo aún más la eficiencia del proceso y aumentando el riesgo de paradas no planificadas. (Enders & Haeseli, 2011; Cortada et al., 2015).

#### **7.3.3.1.1. Pegaduras en el precalentador de ciclones**

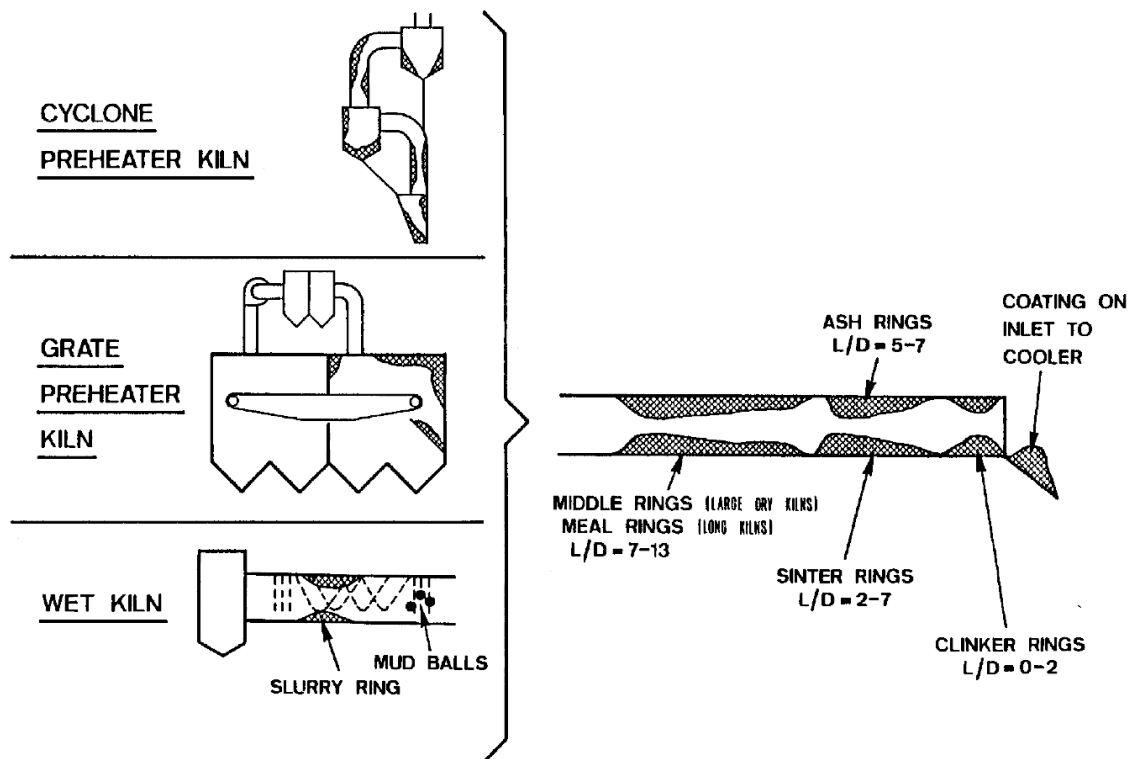
En el precalentador de ciclones se pueden formar depósitos ubicados en los techos, paredes laterales, descargas y ductos ascendentes (Holcim, 2005). Se ha reportado que la composición típica de los depósitos en los ciclones puede ser espurrita  $\text{Ca}_5(\text{SiO}_4)_2(\text{CO}_3)$ , Ellestadita  $\text{Ca}_{10}(\text{SiO}_4)_3(\text{SO}_4)_3\text{Z}_2$  [Donde Z puede ser OH, F o Cl] y Anhidrita  $\text{CaSO}_4$  (Cortada, 2014).

Los mecanismos de reacción de la aparición de dichos compuestos se dan desde la interacción entre cloruros e hidróxidos alcalinos con los óxidos contenidos en la harina cruda. La formación de la espurrita y ellestadita siguen las siguientes reacciones (Enders & Haeseli, 2011).



**Figura 14.**

*Anillos y pegaduras en el sistema de clinkerización*



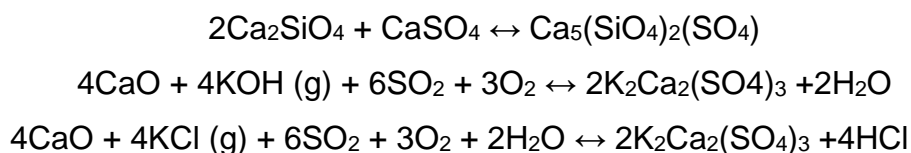
*Nota.* Ubicación de las zonas de incrustaciones más frecuentes. Holcim (2005). *Rings, Balls and Build-Ups*. (<https://pdfcoffee.com/kiln-coating-and-rings-formation-pdf-free.html>). Consultado el 21 de marzo de 2023. De dominio público.

### 7.3.3.1.2. Formación de anillos en el túnel rotatorio

Se ha reportado que uno de los principales compuestos presentes en los anillos del túnel rotatorio es la sulfoespurríta  $\text{Ca}_5(\text{SiO}_4)_2(\text{SO}_4)$  y la ca-langbeinita  $\text{K}_2\text{Ca}_2(\text{SO}_4)_3$ . La sulfoespurríta es un silicato de calcio y sulfato que se forma en la presencia de altas concentraciones de sulfatos. La ca-langbeinita es un sulfato doble de calcio y potasio. La función de estos compuestos en la formación de anillos en hornos rotatorios se relaciona con las siguientes condiciones:

- Presencia de sales fundidas: La formación de estos compuestos indica la presencia de sales fundidas, como sulfatos y cloruros de metales alcalinos y alcalinotérreos. Estas sales fundidas pueden tener puntos de fusión más bajos que el clínker y pueden condensarse en las paredes del horno, lo que facilita la acumulación de material y la formación de anillos.
- Fluctuaciones en la temperatura: La sulfoespurríta y la ca-langbeinita pueden formarse a temperaturas específicas dentro del horno rotatorio. Si hay fluctuaciones en la temperatura o zonas de temperaturas más bajas, estos compuestos pueden precipitar y reforzar la formación de anillos (Nievoll et al., 2007).

Los mecanismos de reacción de la formación de dichos compuestos se dan a partir de la interacción entre cloruros e hidróxidos alcalinos con los óxidos contenidos en la harina cruda. La formación de la sulfoespurríta y ca-langbeinita siguen las siguientes reacciones (Enders & Haeseli, 2011).



## 8. PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	I
ÍNDICE DE TABLAS.....	II
LISTA DE SÍMBOLOS.....	III
GLOSARIO.....	IV
RESUMEN.....	V
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE PREGUNTAS ORIENTADORAS.....	VI
OBJETIVOS.....	VII
RESUMEN DEL MARCO METODOLOGICO.....	VIII
INTRODUCCIÓN.....	IX
1. MARCO TEÓRICO.....	1
<b>1.1. Proceso industrial del cemento</b>	
1.1.1. Molienda de harina cruda	
1.1.1.1.    Química de la harina cruda	
1.1.1.2.    Fuentes de álcalis, cloro y azufre en harina cruda	
1.1.2. Clinkerización	
1.1.2.1.    Horno de clinkerización	
1.1.2.1.1.    Precalentador	
1.1.2.1.2.    Horno rotatorio	
1.1.2.1.3.    Sistema de enfriamiento	
1.1.2.2.    Etapas físicas y químicas	
1.1.2.2.1.    Reacciones por debajo de 1300 °C	
1.1.2.2.2.    Reacciones entre 1300 y 1450 °C	
1.1.2.2.3.    Reacciones durante el enfriamiento	

## **1.2. Combustión industrial**

1.2.1. Elementos de la combustión

1.2.2. Reacciones químicas en la combustión

1.2.2.1. Oxidación del azufre

1.2.3. Combustibles industriales

1.2.3.1. Combustibles convencionales, derivados del petróleo

1.2.3.2. Combustibles alternos, AFR's

1.2.3.3. Tipos de AFR's

1.2.3.4. Uso de AFR's en hornos de clinkerización

1.2.3.5. Consideraciones en el proceso de clinkerización por el uso de AFR's

## **1.3. Ciclos de recirculación en el proceso de clinkerización**

1.3.1. Elementos volátiles y principales procesos químicos

1.3.1.1. Afinidad de elementos en circulación

1.3.2. Problemas derivados y principales métodos de control

1.3.3. Balance de álcalis-cloro/azufre

2. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

ANEXO



## **9. METODOLOGÍA**

### **9.1. Enfoque**

La presente investigación tiene un enfoque cuantitativo porque se basa en la medición de variables numéricas, como la concentración de cloro y azufre en función de la proporción de aporte térmico de cada combustible; y en la optimización de costos mediante la utilización de modelos matemáticos. El enfoque cuantitativo es apropiado para esta investigación porque permite obtener resultados precisos y medibles a través del uso de herramientas estadísticas.

### **9.2. Alcance de la investigación**

El alcance explicativo se justifica porque la investigación busca establecer una relación causal entre las proporciones de combustibles y las concentraciones de elementos circulantes; y, a su vez, cómo estas variables influyen en la carga térmica y los costos. Con esto, se busca explicar cómo la optimización de la carga térmica puede influir en la operación de la planta.

### **9.3. Diseño**

Se trata de un diseño experimental. En este caso, se manipula la proporción de los diferentes combustibles utilizados en los quemadores para observar su efecto en la concentración de cloro y azufre, y para optimizar los costos. El diseño experimental es apropiado para esta investigación porque permite controlar las variables y establecer una relación causal entre las variables independientes y las variables dependientes.

#### 9.4. Tipo de estudio

Se realizará una evaluación de costos totales y unitarios a través de un análisis de sensibilidad en un simulador. Para ello se delimitará como unidad de análisis a la obtención de cada combustible por separado: coque de petróleo, búnker, aceite y llantas en desuso. Mientras que para el estudio del efecto de la proporción de combustibles utilizados en los quemadores sobre los ciclos de circulación se delimitará como unidad de análisis al conjunto de combustibles suministrados a los quemadores, gases de combustión que circulan en el sistema, la fase sólida/líquida en proceso y clínker; los cuales interactúan entre sí dentro del horno y precalentador para dar lugar a la generación de ciclos de recirculación interna.

#### 9.5. Operacionalización de variables

**Tabla 6.**

*Operacionalización de variables*

Objetivo	Tipo de variable	Propiedad operaciona- lizada	De acuerdo con el uso	Niveles de medición	Dimensione s	Indicadores
Evaluar los costos relativos totales de las diferentes combinaciones de combustibles utilizados en el proceso de clinkerización a través de la implementación de un análisis de sensibilidad, planteando un simulador que se pueda utilizar en la etapa de optimización del consumo térmico.	Costos totales y unitarios de combustibles	Numérica continua	Variable de salida	Medición de razón	- Flujo másico de los combustibles - Consumo térmico - Reporte de costos por obtención de combustibles	(Unidades monetarias ponderadas) / h
	Proporción de aporte térmico de cada combustible	Numérica continua	Variable de entrada	Medición de razón	- Asignados en el simulador	% (Energía aportada por combustible i/Energía total)

Continuación de la tabla 6. *Operacionalización de variables*

Objetivo	Tipo de variable	Propiedad operaciona- lizada	De acuerdo con el uso	Niveles de medición	Dimensiones	Indicadores
Caracterizar el efecto que tiene la variación de la proporción de combustibles, para las combinaciones estudiadas, sobre los ciclos de recirculación de elementos volátiles, mediante la implementación de un ensayo de balance de alcalis, cloro y azufre con puntos específicos de muestreo en el horno y torre de ciclones.	Proporción de aporte térmico de cada combustible	Numérica continua	Variable de entrada	Medición de razón	- Manipulada en controladores PID	% (Energía aportada por combustible i/Energía total)
	Indicador de la relación (álcalis – cloro) / azufre	Numérica continua	Variable de salida	Medición de razón	- Concentraciones de cloro, azufre y álcalis en harina caliente evaluadas para cada proporción	% [(%/mA - %m/mCl) / %m/mS]
Determinar rangos óptimos de operación del porcentaje de combustibles a través de un análisis integral de costos y concentración de elementos circulantes en el horno y torre de ciclones.	Restricciones del solver para obtener resultados óptimos Proporciones de aporte térmico de cada combustible óptimas	Numérica continua	Variable de salida	Medición de razón	- Resultado de solver para minimizar los modelos económico y operacional - Relaciones matemáticas y criterios de optimización - Restricciones del solver para obtener resultados óptimos	% (Energía aportada por combustible i/Energía total)

*Nota.* Operacionalización de las variables a ser evaluadas a partir de los objetivos de investigación. Elaboración propia, realizado con Excel.

## 9.6. Fases de la investigación

## 9.7. Fases de la investigación

A continuación, se detalla la estrategia general de recolección de información para cumplir con los objetivos de investigación.

### **9.7.1. Fase 1 diseño de un simulador de costos ponderados**

Para el primer objetivo se solicitará al área de administración de costos de la empresa la documentación de los costos unitarios para la obtención de los combustibles analizados y utilizados en la línea de producción. Con esto se construirá un simulador en el software Excel, donde se transformará un set de proporciones aporte térmico de los combustibles utilizados en el costo total ponderado y costos unitarios ponderados para un consumo térmico especificado.

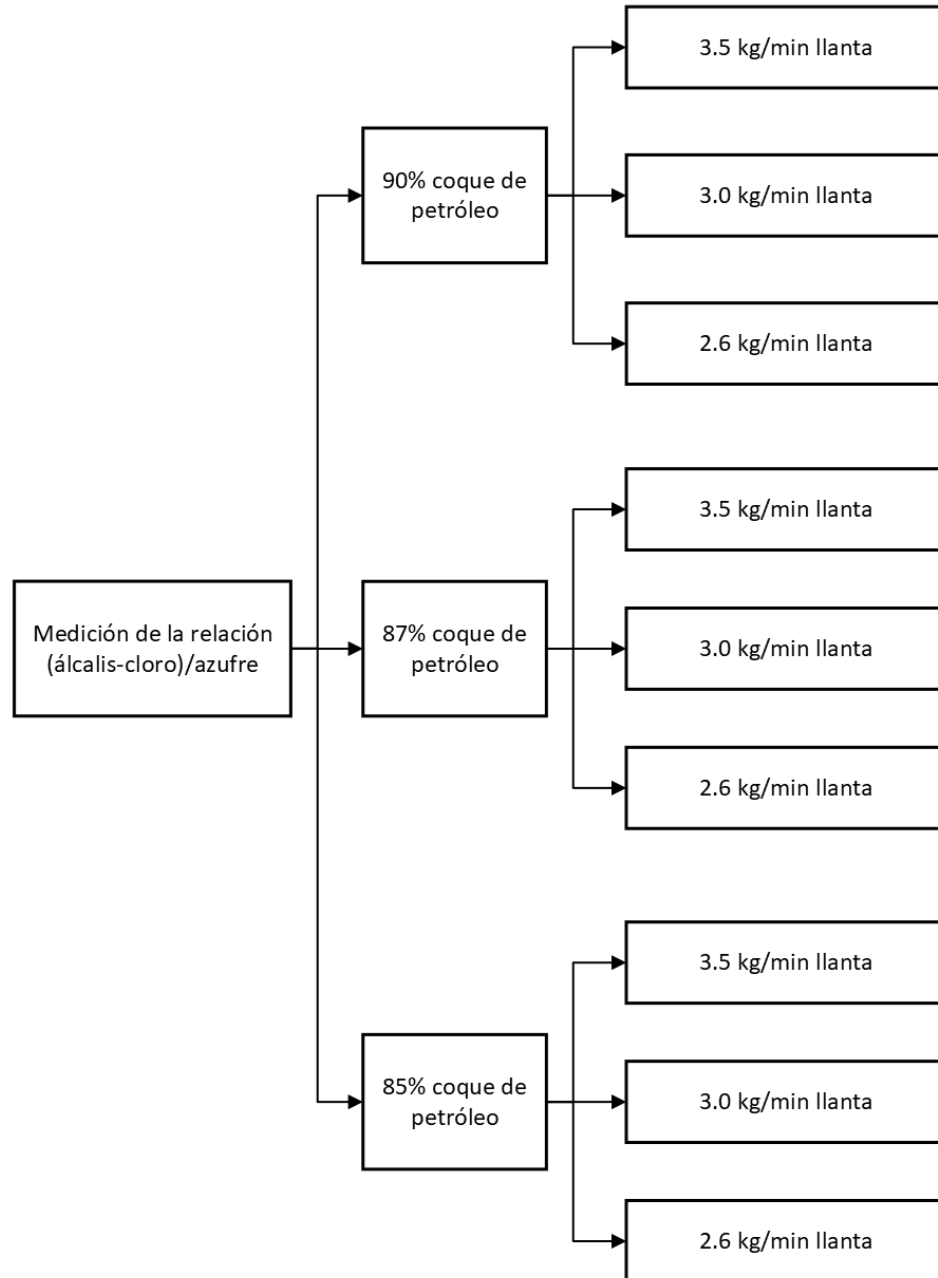
### **9.7.2. Fase 2 Construcción de un modelo lineal múltiple**

En el segundo objetivo se plantean dos diseños experimentales en el que se tendrán dos grados de libertad, por lo que las variables independientes serán la proporción de coque de petróleo utilizado en el quemador principal y la de combustible líquido en el quemador auxiliar; en la que, para el primer diseño experimental, se evaluará para el uso de búnker; y aceite en el segundo diseño experimental. Las variables dependientes serán la relación de (álcalis – cloro) / azufre que se determinará a través de la medición en puntos específicos de muestreo de los porcentajes en masa de cloro, azufre y álcalis y el consumo térmico que se evaluará a través de los datos del software de automatización.

Para determinar la relación de estas variables se plantea realizar una regresión lineal múltiple, teniendo como alternativa la búsqueda de una regresión no lineal múltiple, de los datos que permita la obtención de un modelo matemático que se ajuste a los datos experimentales y se pueda confirmar su validez a partir de la evaluación de la bondad de ajuste con el coeficiente de determinación  $R^2$  y el uso del análisis de varianza de dos tratamientos (ANOVA) en el software de análisis estadístico Jamovi, Qtiplot y Statgraphics.

**Figura 15.**

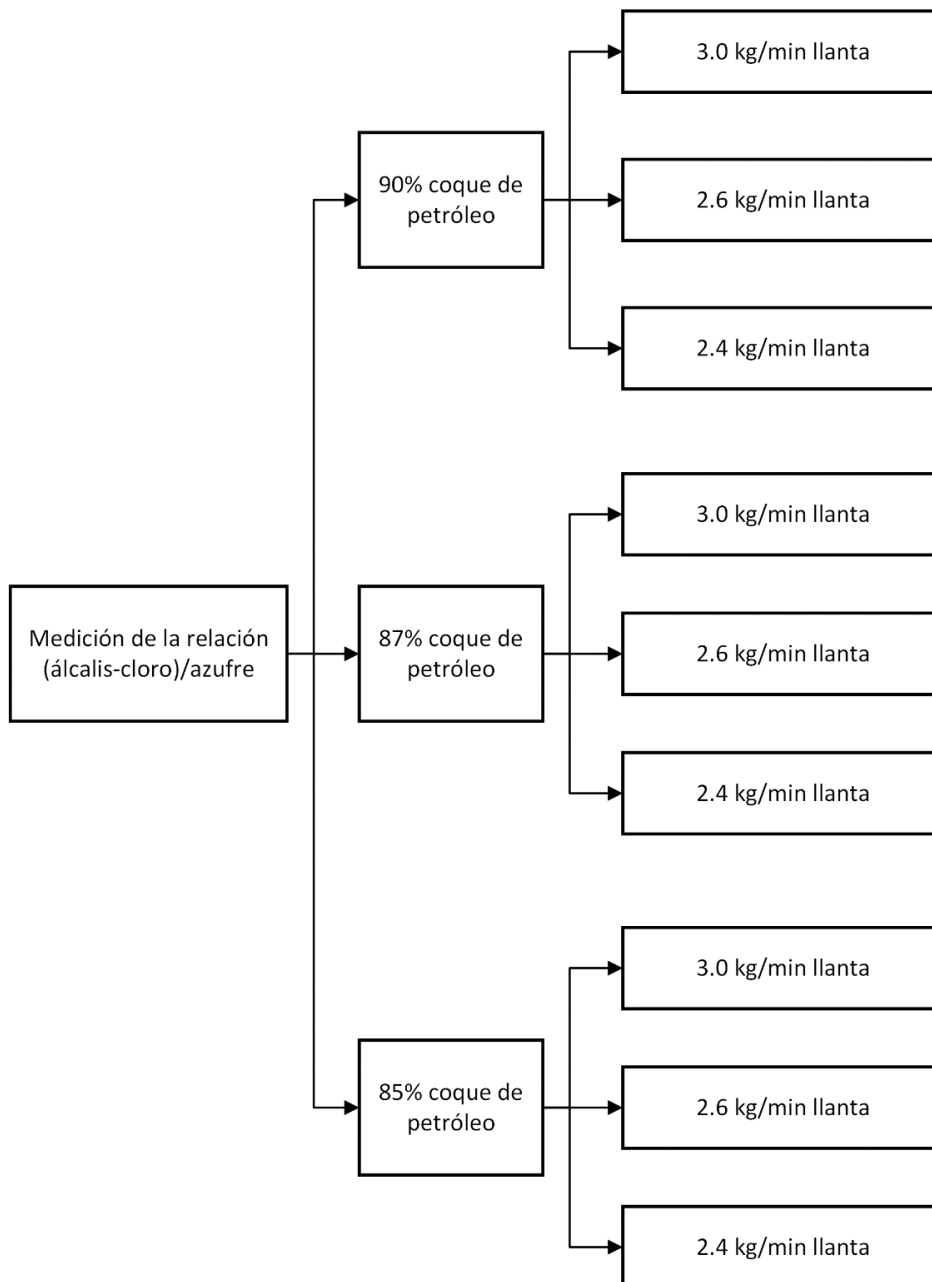
*Diseño experimental para la configuración Principal: Coque de petróleo y Auxiliar: Búnker + Llanta*



*Nota.* Distribución de tratamientos. Elaboración propia, realizado con Visio.

**Figura 16.**

*Diseño experimental para la configuración Principal: Coque de petróleo y Auxiliar: Aceite + Llanta*



*Nota.* Distribución de tratamientos. Elaboración propia, realizado con Visio.

La estrategia para llevar las condiciones de operación de dosificación de combustibles consiste en plantear un porcentaje de aporte térmico en el quemador principal con coque fijo entre 90% y 85% y evaluarlo a 3 diferentes tiempos de llanta. Se utilizará el tiempo de llanta como condición de control debido a que el operador se basa en minutos exactos para contar el tiempo entre cada llanta que entra a la recámara. De acuerdo con el tamaño de llanta utilizada como AFR se tienen los siguientes datos que serán utilizados como guía para estandarizar la dosificación de combustible para cada tratamiento.

**Tabla 7.**

*Operación de dosificación de llanta en desuso*

Tipo de llanta	Peso de llanta (kg)	tiempo (min)	Flujo (kg/min)	Promedio (kg/min)
Pequeña	9.10	2.5	3.64	3.5
Mediana	11.80	3.5	3.37	
Grande	15.30	4.5	3.40	
Pequeña	9.10	3.0	3.03	3.0
Mediana	11.80	4.0	2.95	
Grande	15.30	5.0	3.06	
Pequeña	9.10	3.5	2.60	2.7
Mediana	11.80	4.5	2.62	
Grande	15.30	5.5	2.78	
Pequeña	9.10	4.0	2.28	2.40
Mediana	11.80	5.0	2.36	
Grande	15.30	6.0	2.55	

*Nota.* Definición de los flujos de llanta utilizados. Elaboración propia, realizado con Excel.

De acuerdo con la guía para la implementación del balance de álcalis, cloro y azufre se necesitan de muestreos horarios durante 8 horas para cada condición a la que se desee evaluar las concentraciones de elementos volátiles. Planteando los dos escenarios:

- Principal: Coque de petróleo y Auxiliar: Búnker + Llanta
- Principal: Coque de petróleo y Auxiliar: Aceite + Llanta

Para cumplir con el diseño experimental se plantea realizar la evaluación de cada tratamiento durante una semana. Por lo que se requerirá de 18 semanas en total para cumplir con el experimento correlacional.

#### **9.7.2.1. Procedimiento para la realización de una corrida experimental**

La metodología experimental se basará en el procedimiento expuesto en la guía para la aplicación del balance de álcalis/cloro/azufre. Se modificarán las condiciones de dosificación de combustibles para llegar a los valores de proporciones propuestas en el diseño experimental y que al mismo tiempo cumpla con la calidad del proceso de clinkerización. Después de 8 horas de estabilidad a las condiciones de operación se comenzará con el plan de muestreo de harina cruda, harina caliente, clínker y combustibles en los puntos designados. Las muestras recolectadas se trasladarán hacia el laboratorio de control de calidad para determinar las concentraciones de óxido de sodio  $\text{Na}_2\text{O}$ , óxido de potasio  $\text{K}_2\text{O}$ , Cloro  $\text{Cl}_2$  y azufre  $\text{SO}_3$ .

- El operador de control central modificará los flujos de combustibles en el quemador principal y auxiliar del horno para la proporción evaluada. Para ello se tendrá una guía de flujos recomendados utilizando la hoja de cálculo interna de *"Fuel Mix"*.
- Durante las siguientes 8 horas evaluará la tendencia de los datos de calidad y evaluará si se debe variar la carga térmica para mantener la sostenibilidad de la calidad del clínker producido.
- Al finalizar el periodo de evaluación de las condiciones de operación se dejará el horno estable, sin realizar ningún movimiento en sus variables de operación durante 8 horas.



### **9.7.3. Fase 3 Optimización a partir de un análisis integral**

El tercer objetivo plantea la integración del modelo matemático al simulador de costo total ponderado para programar una herramienta solver con restricciones que definan el valor de costo total mínimo y relación óptima de (álcalis – cloro) / azufre para determinar la combinación de combustibles que cumpla con estos criterios para los casos en los que se usa aceite y búnker en el quemador auxiliar.



## 10. TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE INFORMACIÓN

### 10.1. Técnicas y plan de tabulación de datos

**Tabla 8.**

*Variables y técnicas de recolección*

Objetivos	Variable	Tipo de variable	Indicadores	Técnica	Plan de tabulación
Evaluar los costos relativos totales de las diferentes combinaciones de combustibles utilizados en el proceso de clinkerización a través de la implementación de un análisis de sensibilidad, planteando un simulador que se pueda utilizar en la etapa de optimización del consumo térmico.	Proporción de aporte térmico de cada combustible	Numérica continua	Energía aportada por cada combustible % (Energía aportada por el combustible <i>i</i> / Energía total)	Dos variables independientes en el simulador y la tercera será el complemento al 100%	Se abrirán 2 campos en el simulador para asignar valores a las variables, la tercera se calculará dentro de la matriz de análisis
	Consumo térmico	Numérica continua	Energía por unidad de clínker producido (MJ/t)	Será una variable independiente e utilizada	Se abrirá un campo en el simulador para asignación de valores
	Costo unitario relativo de combustibles	Numérica continua	Costo por unidad de tiempo (CUR/h)	Reporte de costos del área administrativa	Se tabulará por medio de una matriz de análisis en el simulador
	Costo total relativo de combinación de combustibles	Numérica continua	Costo por unidad de tiempo (CTR/h)	Suma de costos unitarios relativos	Se tabulará por medio de una matriz de análisis en el simulador

Continuación de la tabla VIII. Variables y técnicas de recolección

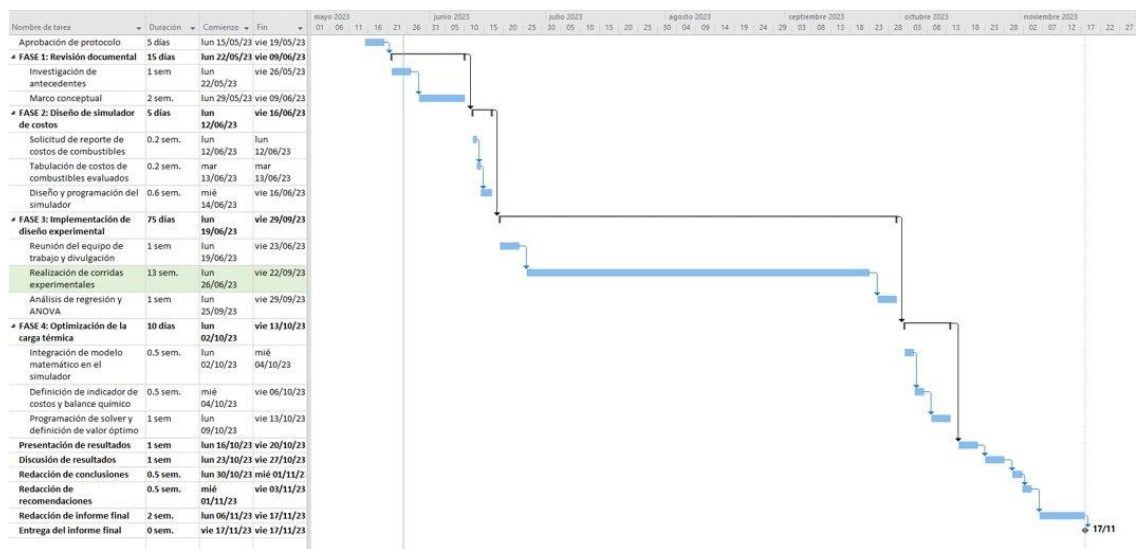
Objetivos	Variable	Tipo de variable	Indicadores	Técnica	Plan de tabulación
Caracterizar el efecto que tiene la variación de la proporción de combustibles, para las combinaciones estudiadas, sobre los ciclos de recirculación de elementos volátiles, mediante la implementación de un ensayo de balance de álcalis, cloro y azufre con puntos específicos de muestreo en el horno y torre de ciclones.	Proporción de aporte térmico de cada combustible	Numérica continua	Energía aportada por cada combustible % (Energía aportada por el combustible i/ Energía total)	Contador del HMI utilizado para control de proceso de quemador auxiliar y principal. y flujos promedios de los combustibles	Los resultados se tabularán en una matriz de análisis
	Consumo térmico	Numérica continua	Energía por unidad de clínker producido (MJ/t)	Contador del HMI utilizado para el control de procesos para el valor promedio de las 8 horas de muestreo	Se tabularán los resultados en una matriz de análisis
	Álcalis, Cloro y azufre en harina caliente	Numérica continua	Porcentaje en masa %m/m	Medición por espectrometría de fluorescencia de rayos X (XRF)	Se tabularán los resultados en una matriz de análisis
	Relación (álcalis-cloro)/azufre	Numérica continua	Adimensional [(%m/mA - %m/mCl) / %m/mS]	Determinación a partir de concentraciones	Se tabularán los resultados en una matriz de análisis
Determinar rangos óptimos de operación del porcentaje de combustibles a través de un análisis integral de costos y concentración de elementos circulantes en el horno y torre de ciclones.	Proporciones óptimas de aporte térmico de cada combustible	Numérica continua	Energía óptima aportada por cada combustible % (Energía aportada por el combustible i/ Energía total)	Cálculo por medio de programación de solver en el simulador planteado	Se tabularán los resultados en una matriz de análisis

Nota. Definición de variables y técnicas de recolección. Elaboración propia, realizado con Excel.

# 11. CRONOGRAMA

**Tabla 9.**

*Cronograma del desarrollo de las fases de investigación*



*Nota.* Cronograma. Elaboración propia, realizado con Project.



## 12. FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO

### 12.1. Recursos humanos disponibles

Para esta investigación se cuenta con el apoyo de personal capacitado para desarrollar tareas técnicas requeridas en la planificación e implementación de la metodología planteada.

- Investigador: Pedro Luis Castañeda Mendez
- Asesor: Ing. Lee Stevens Hernández Rivera
- Equipo de apoyo: Personal de producción, control de calidad y optimización

### 12.2. Recursos materiales disponibles

**Tabla 10.**

*Materiales y equipos disponibles*

Tipo de material	Nombre	Procedimiento en el que se utilizará
Insumo de proceso	Harina cruda para fabricación de cemento tipo I	Medición de elementos volátiles
	Coque de petróleo	Combustión
	Búnker	Combustión
	Llantas en desuso (AFR)	Combustión
	Aceite (AFR)	Combustión
	Harina caliente en la recámara del horno	Medición de elementos volátiles
	Gases de combustión en la salida del sistema	Medición de elementos volátiles
	Clínker	Medición de elementos volátiles

Continuación de la tabla 10. *Materiales y equipo disponible*

<b>Tipo de material</b>	<b>Nombre</b>	<b>Procedimiento en el que se utilizará</b>
Instrumentos	Recolector de muestras de harina	Recolección de muestras de harina cruda y harina caliente
	Pala	Recolección de muestras de clínker
	Recipientes	Almacenamiento y transporte de muestras a ser analizadas
Oficina	Papel	Registro de datos
	Lapicero	Registro de datos
	Computadora	Tabulación de datos
Equipos	Sistema de clinkerización	Clinkerización
	Espectrómetro de fluorescencia de rayos X (XRF)	Medición de concentraciones de elementos volátiles en muestras

*Nota.* Materiales utilizados en la ejecución del estudio. Elaboración propia, realizado con Excel.

### 12.3. Presupuesto y fuentes de financiamiento

La realización de la metodología será financiada por el investigador y empresa dentro de la cual se realiza el proceso de producción.

**Tabla 11.**

*Presupuesto*

<b>Item</b>	<b>Recurso</b>	<b>Descripción</b>	<b>Monto (Q)</b>	<b>Porcentaje</b>
1	Humano (tesista)	Inversión de tiempo por el investigador	10,000.00	14.81%
2	Humano (asesor)	Asesor de trabajo de investigación	2,500.00	3.70%
3	Materiales	Uso de materiales de oficina para la recolección de datos	2,500.00	3.70%



Continuación de la tabla 11. Presupuesto

Item	Recurso	Descripción	Monto (Q)	Porcentaje
4	Instrumentos	Utilizados para la recolección y transporte de muestras	500.00	0.74%
5	Análisis de laboratorio	Análisis de laboratorio para determinación de concentraciones de elementos volátiles	50,000.00	74.07%
6	Otros	Gastos varios de imprevisto	2,000.00	2.96%
Total			67,500.00	100%

*Nota.* Detalle del presupuesto para la realización del proyecto de investigación. Elaboración propia, realizado con Excel

Se concluye que la realización del estudio sí es factible, debido a que se cuentan con los recursos humanos, materiales y el presupuesto para realizarlo.



## REFERENCIAS

- ASTM International. (2012). *Standard Specification for Portland Cement* (ASTM C150-07). <https://doi.org/10.1520/C0150-07>
- ASTM International. (2010). *Standard Performance Specification for Hydraulic Cement* (ASTM C1157-08a). <https://doi.org/10.1520/C1157-08A>
- ASTM International. (2010). *Standard Specification for Blended Hydraulic Cements* (ASTM C595-08a). <https://doi.org/10.1520/C0595-08A>
- Bhatty, J. (1995). *Rolle of minor elements in cement manufacture and use*. Research and Development Bulletin RD109T. Portland Cement Association. Skokie, Illinois, USA.
- Castillo, P. (2011). *Manual práctico de combustión industrial*. Díaz de Santos.
- CEMBUREAU. (1999). *“Best Availables Techniques” For The Cement Industry*. Recuperado de [http://files.gamta.lt/aaa/Tipk/tipk/4\\_kiti%20GPGB/40.pdf](http://files.gamta.lt/aaa/Tipk/tipk/4_kiti%20GPGB/40.pdf)
- Chatterjee, A. & Sui, T. (2019). Alternative fuels – Effects on clinker process and properties. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105777>
- Chatterjee, A. (2018). *Cement Production Technolgy Principles and Practice*. Florida, Estados Unidos: Taylor & Francis Group.

Cortada M., Nørskov, L., Jappe, F., Glaborg, P. y Dam, K. (2015). Review: Circulation of Inorganic Elements in Combustion of Alternative Fuels in Cement Plants. *Energy and Fuels*, 29(7), 4076-4099. <https://doi.org/10.1021/ef502633u>.

Cortada, M. (2014). *Sulfur Release during Alternative Fuels Combustion in Cement Rotary Kilns*. (Tesis doctoral). Technical University of Denmark, Department of Chemical and Biochemical Engineering. Dinamarca.

Del Cid, R. (2018). Evaluación del impacto de cloro proveniente de la alimentación de combustible alternativo en el horno de la línea dos para la fabricación de clinker en una industria cementera. <http://www.repositorio.usac.edu.gt/id/eprint/10910>

Deolakar, S. (2009). *Handbook for designing cement plants*. Hyderabad, India: BS Publications.

Enders, M. y Haeseli, U. (2011). Reactions of alkalis, chlorine and sulfur during clinker production. *Cement International*, 9(3), 38-53.

European Commission Joint Research Centre (2013). *Best available techniques (BAT) reference document for the production of cement, lime and magnesium oxide*. Recuperado de [https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/2019-11/CLM\\_Published\\_def\\_0.pdf](https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/2019-11/CLM_Published_def_0.pdf)

Glasser, F. (2004). Advances in cement clinkering. En J. Bhatti, F. Miller & S. Kosmatka (Eds.), *Innovations in portland cement manufacturing* (Cap. 3.4, pp. 331-368). Portland Cement Association.

- GTZ-Holcim Public Private Partnership. (2006). Guidelines on Co-Processing Waste Materials in Cement Production: The GTZ-Holcim Public Private Partnership. Recuperado de [https://optoce.no/wp-content/uploads/2019/03/Holcim-GTZ-guideline\\_coprocem\\_v06-06.pdf](https://optoce.no/wp-content/uploads/2019/03/Holcim-GTZ-guideline_coprocem_v06-06.pdf)
- Gu, Y., Cao, H., Liu W., Lin, X., Zheng, T., Cheng, W., Huang, J. & Xu, J. (2021). Impact of co-processing sewage sludge on cement kiln NOx emissions reduction. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105511>
- Haaf, E., Schwab, F. y Bissell, H. (2022). sedimentary rock. *Encyclopedia Britannica*. <https://www.britannica.com/science/sedimentary-rock>
- Hanein, T., Hayashi, Y., Utton, C., Nyberg, M., Martinez, J., Quintero, N. & Kinoshita, H. (2020). *Pyro processing cement kiln bypass dust: Enhancing clinker pase formation*. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120420>
- Hay, A., Salamony, E., Mahmoud H. & Shehata, N. (2020). Enhancing the efficiency of a cement plant kiln using modified alternative fuel. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2020.100310>
- Holcim. (2005). Capítulo 4: Rings, Balls and Build-ups. En Holcim (Ed.), Cement Manufacturing Course (Volumn 2, pp. 136-155). Holcim. <https://pdfcoffee.com/kiln-coating-and-rings-formation-pdf-free.html>
- Holcim. (2019). Guidelines on Pre- and Co-processing of Waste in Cement Production. Recuperado de

[https://www.holcim.com/sites/holcim/files/images/guidelines\\_pre-coprocem\\_2019\\_web.pdf](https://www.holcim.com/sites/holcim/files/images/guidelines_pre-coprocem_2019_web.pdf)

Kang, R., Xing, T., Ma, S., Min, H., Zhou, H., Shen, X. & Sun J. (2021). The effect of gaseous SO<sub>2</sub> secondary sintering on the cement composition and crystal structure. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122872>

Knöfel, D. (1983). Cement chemistry – cement quality. En O. Labahn y B. Kohlhaas (Ed.), *Cement Engineers´ Handbook*. (pp. 103-171). Wiesbaden, Berlín, Alemania: Bauverlag.

Lanzerstorfer, C. (2016). Residue from the chloride bypass de-dusting of cement kilns: Reduction of the chloride content by air classification for improved utilisation. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2016.06.010>

Miller, F., Young, G. y Seebach, M. (2001). *Formation and Techniques for Control of Sulfur Dioxide and Other Sulfur Compounds in Portland Cement Kiln Systems*, R&D Serial No. 2460, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, USA.

Mullinger, P. y Salkield, E. (2023). *Industrial and process furnaces: Principles, design and operation*. Butterworth-Heinemann: Oxford, United Kingdom.

Nievoll, J., Jörg, S., Dösinger, K. y Corpus, J. (2007). *Sulphur, Spurrite and Rings – Always a Headache for the Cement Kiln Operator?* RHI Bulletin (2).

Pocaccini, C. (1999). *The chemistry of chlorine in combustion systems and the gas-phase formation of chlorinated and oxygenated pollutants* (tesis

doctoral). Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, Estados Unidos.

Sanjuán, M. y Chinchón, S. (2014). Capítulo 3. Qué se conoce como cemento portland en la actualidad. En *Introducción a la fabricación y normalización del cemento portland*. (pp. 18-37). España: Universidad de Alicante.

Taylor, H. (1997). The chemistry of Portland cement manufacture. En (Ed.) *Cement Chemistry* (pp. 55-86). Heron Quay, London: Taylor and Thomas Telford Services Ltd.

Schneider, H. y Binder, U. (1983). Manufacture of cement, Materials preparatio technology. En O. Labahn y B. Kohlhaas (Ed.), *Cement Engineers' Handbook*. (pp. 179-293). Wiesbaden, Berlín, Alemania: Bauverlag.

Spörl, R., Maier, J. y scheffknecht, G. (2013). Sulphur Oxide Emissions from Dust-Fired Oxy-Fuel Combustion of Coal. *Energy Procedia*, 37, 5307-5314. doi: 10.1016/j.egypro.2013.06.464

Vallero, D. A. (2019). *Thermal Reactions*. En *Air Pollutant Calculations: A Concise Guide* (págs. 207-218). Academic Press.

Wang, Y., Zhu, H., Jiang, X., Lv, G. & Yan, L. (2018). Study on the evolution and transformation of Cl during Co-incineration of a mixture of rectification residue and raw meal of a cement kiln. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.11.036>

Wang, Z., Yang, W., Liu, H., Jin, H., Chen, H., Su, K., Tu, Y. & Wang, W. (2019). Thermochemical behavior of three sulfates (CaSO<sub>4</sub>, K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> and Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)

blended with cement raw materials ( $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ) at high temperature. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2019.05.006>

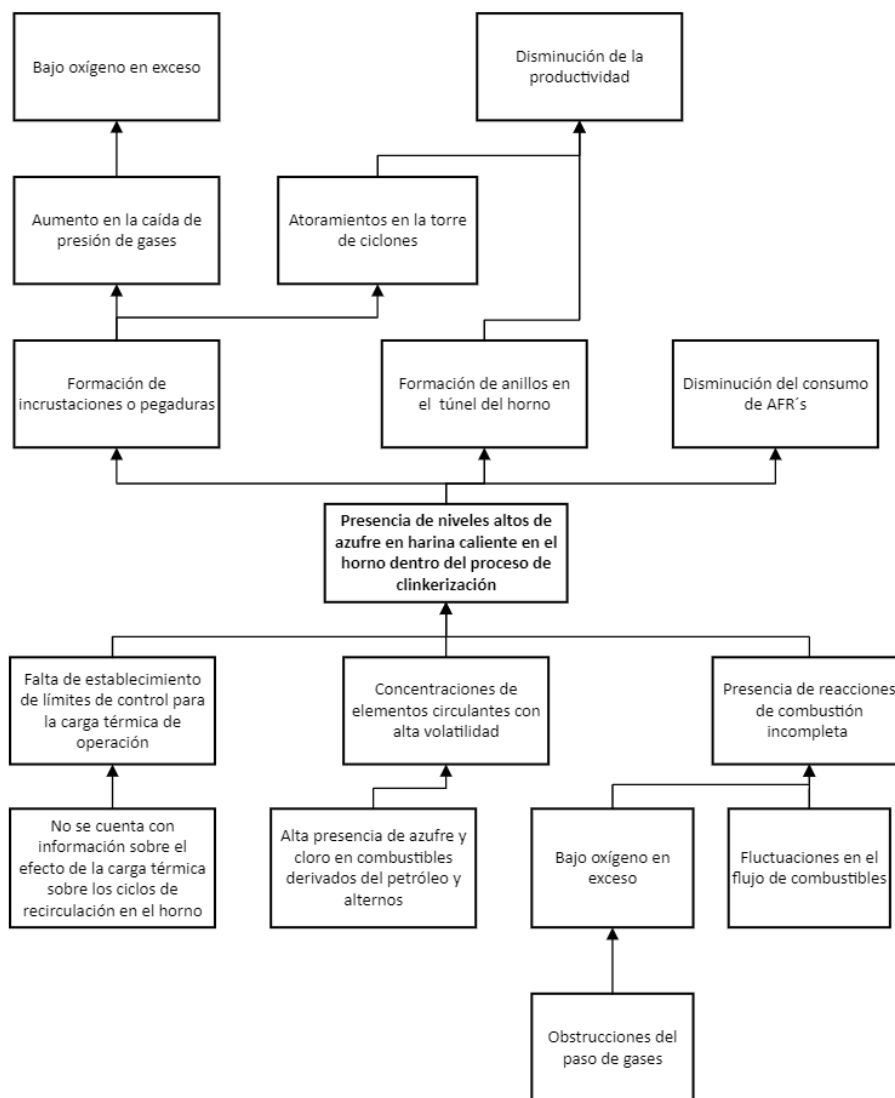
Wirtz, S., Pieper, C., Buss, F., Schiemann, M., Schaefer, S. & Scherer, V. (2019). Impact of coating layers in rotatory cement kilns: Numerical investigation with a blocked-off region approach for radiation and momentum. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2019.100429>



# APÉNDICES

## Apéndice 1.

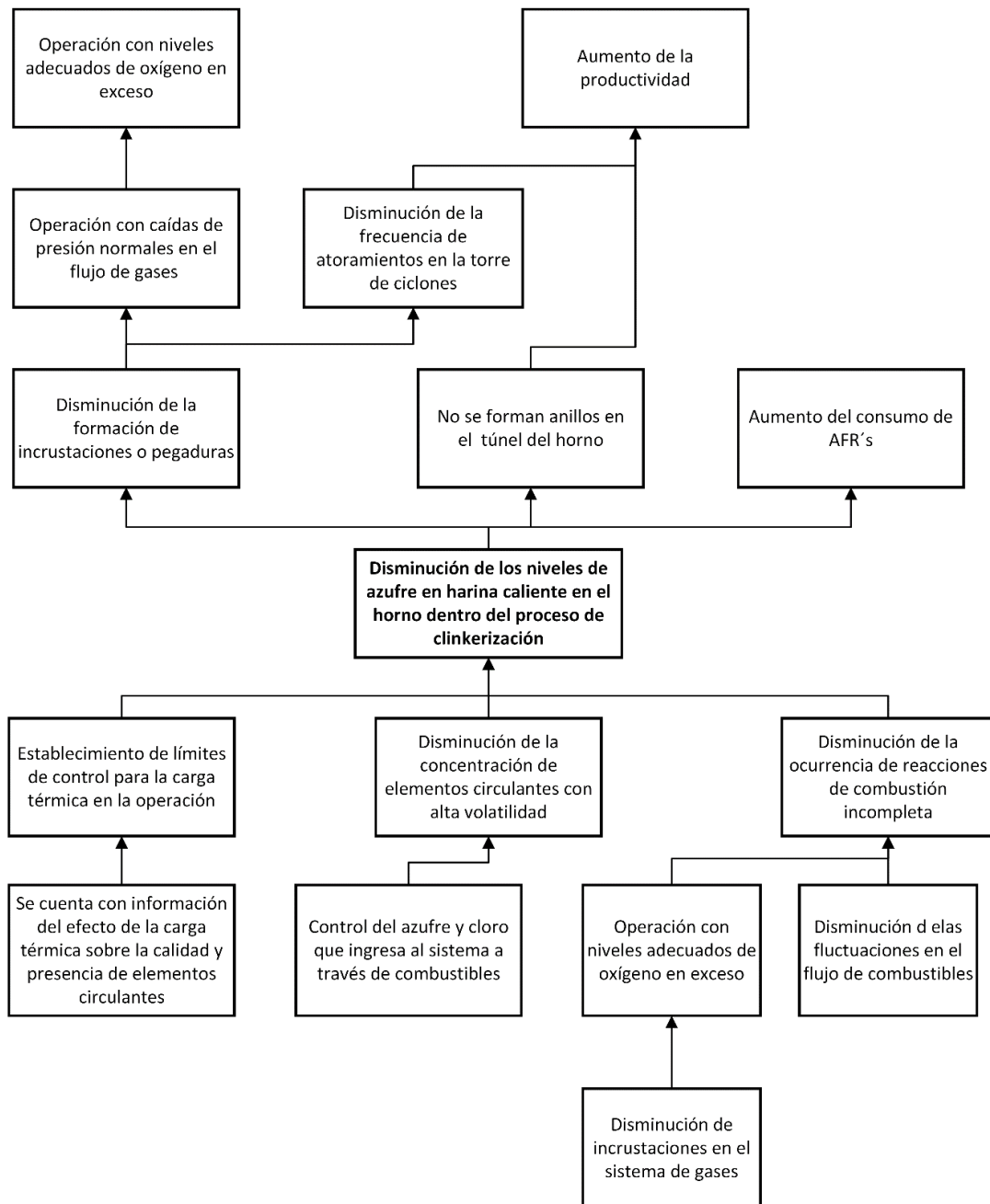
### Árbol de problemas



Nota. Árbol de problemas. Elaboración propia, realizado con Visio.

## Apéndice 2.

### Árbol de objetivos



Nota. Árbol de objetivos. Elaboración propia, realizado con Visio.

### Apéndice 3.

#### Matriz de coherencia

Formulación del problema	Objetivo	Variable	Indicadores	Técnica	Metodología
¿Cómo se puede optimizar la operación de dosificación de combustibles para mantener niveles aceptables del horno de clinkerización?	Optimizar la operación de dosificación de combustibles para mantener condiciones aceptables del horno de clinkerización.	Proporciones óptimas de aporte térmico de cada combustible	Energía óptima aportada por cada combustible % (Energía aportada por el combustible / Energía total)		
1. ¿Cómo se pueden evaluar los costos de insumos energéticos al variar la proporción de combustibles en los quemadores del horno de clinkerización y cómo se puede evaluar las posibles variaciones de estos debido a cambios en los precios?	1. Evaluar los costos relativos totales de las diferentes combinaciones de combustibles utilizados en el proceso de clinkerización.	Proporción de aporte térmico de cada combustible Consumo térmico Costo unitario relativo de combustibles Costo total relativo de combinación de combustibles	Energía aportada por cada combustible % (Energía aportada por el combustible / Energía total) Energía por unidad de clínker producido (MJ/t) Costo por unidad de tiempo (CUR/h)	Las técnicas de recopilación de información consisten en la obtención de un reporte de costos de combustibles utilizados en el proceso de clinkerización. Además, se realizará la determinación de la concentración de elementos volátiles por espectrometría de fluorescencia de rayos X (XRF).	Aplicación de un diseño experimental para establecer las condiciones de dosificación de combustibles a los valores planificados y aplicación de un balance de álcalis/cloro/azufre estandarizado por Holcim en puntos específicos de muestreo para evaluar el comportamiento de los ciclos de recirculación de elementos volátiles. Se utilizarán técnicas de optimización al plantear indicadores que integren la evaluación de costos y las concentraciones de elementos volátiles
2. ¿Cuál es el comportamiento de la concentración de elementos volátiles en el sistema de clinkerización, variando la configuración de combustibles alternos y convencionales en los quemadores del horno?	2. Caracterizar el efecto que tiene la variación de la proporción de combustibles, para las combinaciones estudiadas	Proporción de aporte térmico de cada combustible Consumo térmico Alcalis, Cloro y azufre en harina caliente Relación (álcalis-cloro) /azufre	Energía aportada por cada combustible % (Energía aportada por el combustible / Energía total) Energía por unidad de clínker producido (MJ/t) Porcentaje en masa %m/m Adimensional [(%m/mA - %m/mCl) / %m/mS]		
3. ¿Qué rango de proporciones de combustibles utilizados en el proceso de clinkerización representan la combinación óptima para la operación en términos de costos y sostenibilidad de acumulación de elementos circulantes en el sistema?	3. Determinar rangos óptimos de operación del porcentaje de combustibles	Proporciones óptimas de aporte térmico de cada combustible	Energía óptima aportada por cada combustible % (Energía aportada por el combustible / Energía total)		

Nota. Matriz de coherencia de preguntas de investigación y objetivos. Elaboración propia realizado con Excel

## Apéndice 4.

### Resultado de aplicación del programa Anti-Plagio

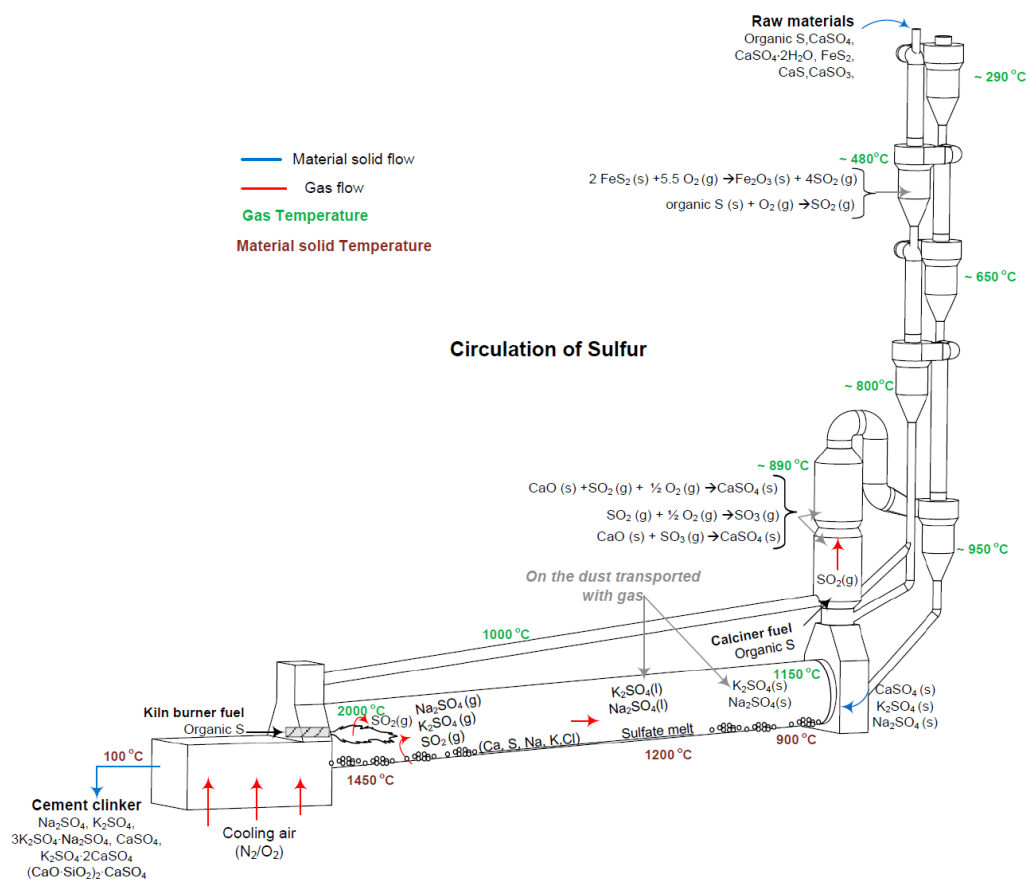
The screenshot displays the PlagScan by Turnitin user interface. At the top, the logo 'PlagScan by Turnitin' is on the left, and navigation links for 'Documentos', 'Configuración', and 'Logout' are on the right. A notification bell icon is also present. Below the navigation, there are three main action buttons: 'Subir archivo', 'Entrada de textos', and 'Importar via Web'. On the left side, a user profile section shows '¡Hola Pedro Luis Castañeda Mendez!' and 'Su saldo: 90' with a 'Recargar' button. Below this is a 'DOCUMENTOS' section with a 'Control de documentos' button. The central area features a document list with a search bar and filters. The selected document is 'Control final.pdf', which has been analyzed. The analysis results show a similarity score of 3.8% and a report link. The document details include '1/41 11 3. ANTECEDENTES El problema de investigación propue:' and '9219 palabras' analyzed on '30/03/2023, 13:32'. A 'Contenido' link is provided. At the bottom, there is a 'Nivel de Similitud' legend with three categories: 0-1% (green), 1-5% (orange), and 5-100% (red). The current result of 3.8% falls into the 1-5% category. The interface also includes a footer with links for 'Mostrar ayuda', 'Invitar', 'Contacto', and 'Accesibilidad'.

*Nota.* Resultado Anti-Plagio aplicado a las secciones de antecedentes y marco teórico.  
Elaboración propia, <https://www.plagscan.com/docman>

# ANEXOS

## Anexo 1.

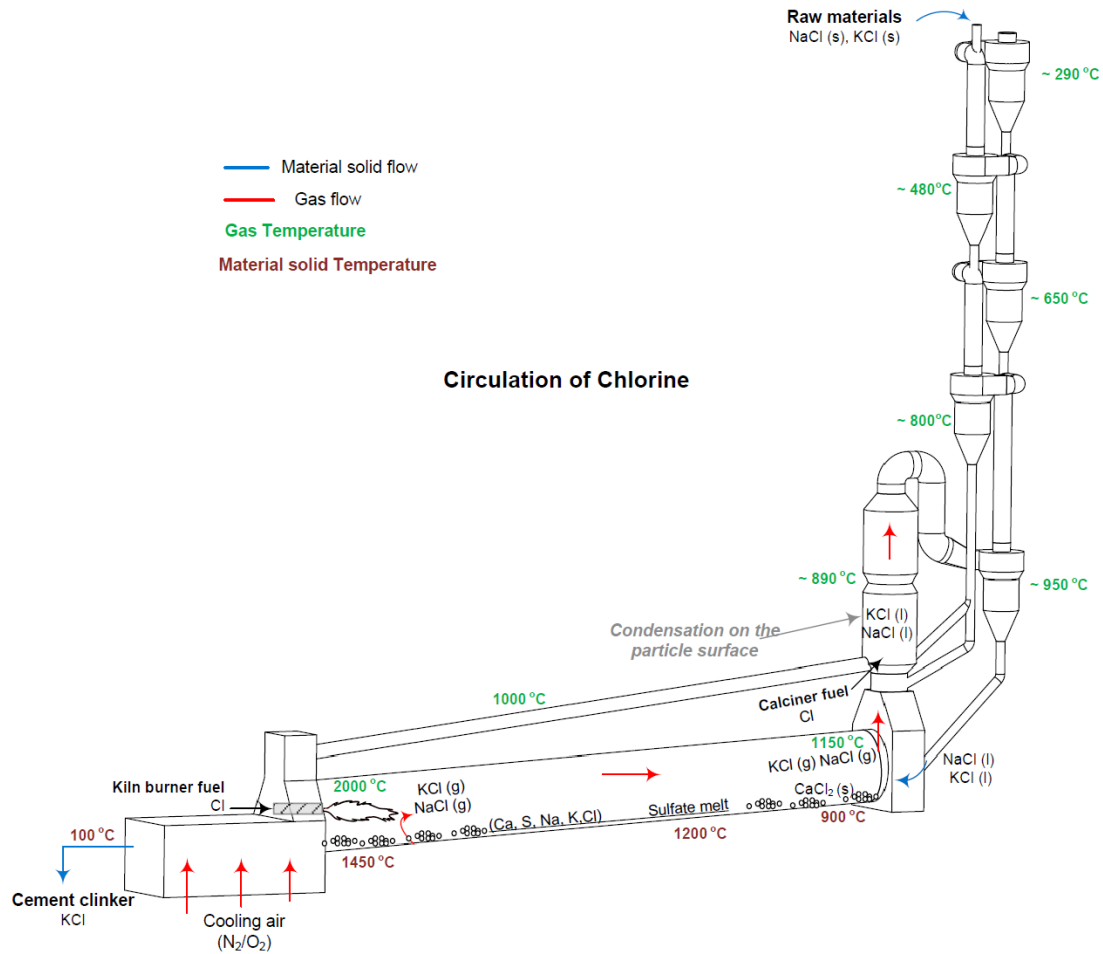
### Circulación de compuestos azufrados en el sistema del horno con calcinador



*Nota.* Ubicación de principales compuestos volátiles azufrados en el sistema de clinkerización. Obtenido de Cortada, M. (2014) *Sulfur Release during Alternative Fuels Combustion in Cement Rotary Kilns*. (Tesis doctoral) Technical University of Denmark, Department of Chemical and Biochemical Engineering. Dinamarca. ([https://backend.orbit.dtu.dk/ws/portalfiles/portal/10517025/1/Maria\\_del\\_Mar\\_Cortada\\_Mut\\_978\\_87\\_93054\\_48\\_6\\_fil\\_fra\\_trykkeri\\_.pdf](https://backend.orbit.dtu.dk/ws/portalfiles/portal/10517025/1/Maria_del_Mar_Cortada_Mut_978_87_93054_48_6_fil_fra_trykkeri_.pdf)) consultado el 2 de abril de 2022.

## Anexo 2.

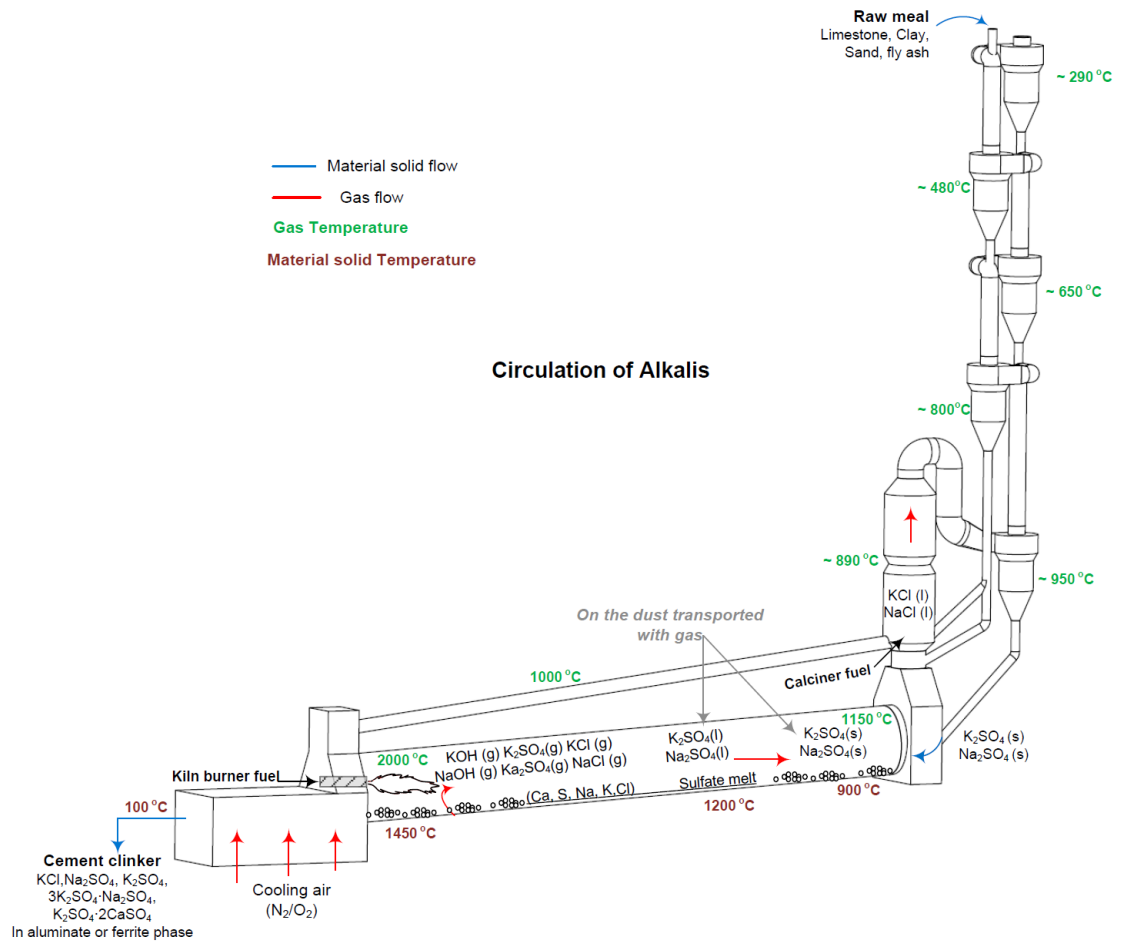
### Circulación de compuestos clorados en el sistema del horno con calcinador



*Nota.* Ubicación de principales compuestos volátiles clorados en el sistema de clinkerización. Obtenido de Cortada, M. (2014) *Sulfur Release during Alternative Fuels Combustion in Cement Rotary Kilns*. (Tesis doctoral) Technical University of Denmark, Department of Chemical and Biochemical Engineering. Dinamarca. ([https://backend.orbit.dtu.dk/ws/portalfiles/portal/105170251/Maria\\_del\\_Mar\\_Cortada\\_Mut\\_978\\_87\\_93054\\_48\\_6\\_fil\\_fra\\_trykkeri\\_.pdf](https://backend.orbit.dtu.dk/ws/portalfiles/portal/105170251/Maria_del_Mar_Cortada_Mut_978_87_93054_48_6_fil_fra_trykkeri_.pdf)) consultado el 2 de abril de 2022.

### Anexo 3.

#### Circulación de compuestos de álcalis en el sistema del horno con calcinador



*Nota.* Ubicación de principales compuestos volátiles clorados en el sistema de clinkerización. Obtenido de Cortada, M. (2014) *Sulfur Release during Alternative Fuels Combustion in Cement Rotary Kilns*. (Tesis doctoral) Technical University of Denmark, Department of Chemical and Biochemical Engineering. Dinamarca. ([https://backend.orbit.dtu.dk/ws/portalfiles/portal/10517025/1/Maria\\_del\\_Mar\\_Cortada\\_Mut\\_978\\_87\\_93054\\_48\\_6\\_fil\\_fra\\_trykkeri\\_.pdf](https://backend.orbit.dtu.dk/ws/portalfiles/portal/10517025/1/Maria_del_Mar_Cortada_Mut_978_87_93054_48_6_fil_fra_trykkeri_.pdf)) consultado el 2 de abril de 2022.