



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

**EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE CLORO PROVENIENTE DE LA ALIMENTACIÓN
DE COMBUSTIBLE ALTERNO EN EL HORNO DE LA LÍNEA DOS PARA LA
FABRICACIÓN DE CLINKER EN UNA INDUSTRIA CEMENTERA**

Roselin María Lucía del Cid Ruíz

Asesorado por el Dr. Adolfo Narciso Gramajo Antonio

Guatemala, septiembre de 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE CLORO PROVENIENTE DE LA ALIMENTACIÓN
DE COMBUSTIBLE ALTERNO EN EL HORNO DE LA LÍNEA DOS PARA LA
FABRICACIÓN DE CLINKER EN UNA INDUSTRIA CEMENTERA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

ROSELIN MARÍA LUCÍA DEL CID RUÍZ

ASESORADO POR EL Dr. ADOLFO NARCISO GRAMAJO ANTONIO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERA QUÍMICA

GUATEMALA, SEPTIEMBRE DE 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Oscar Humberto Galicia Nuñez
VOCAL V	Br. Carlos Enrique Gómez Donis
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Carlos Salvador Wong Davi
EXAMINADOR	Ing. Orlando Posadas Valdéz
EXAMINADOR	Ing. Erwin Manuel Ortiz Castillo
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

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 DE CLORO PROVENIENTE DE LA ALIMENTACIÓN DE COMBUSTIBLE ALTERNO EN EL HORNO DE LA LÍNEA DOS PARA LA FABRICACIÓN DE CLINKER EN UNA INDUSTRIA CEMENTERA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 20 de noviembre de 2017.

Roselin María Lucía del Cid Ruíz

Guatemala, 30 de Abril de 2018

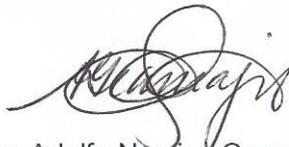
Ingeniero
Carlos Salvador Wong Davi
Director Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala
Presente

Estimado Ingeniero Wong:

Por medio de la presente HAGO CONSTAR que he revisado y dado mi aprobación al informe final del Trabajo de Graduación "EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE CLORO PROVENIENTE DE LA ALIMENTACIÓN DE COMBUSTIBLE ALTERNO EN EL HORNO DE LA LÍNEA DOS PARA LA FABRICACIÓN DE CLINKER EN UNA INDUSTRIA CEMENTERA" del estudiante de Ingeniería Química Roselin María Lucía del Cid Ruíz quien se identifica con el carné número 201403648 y CUI 3438917940207.

Sin otro particular me suscribo de usted.

Atentamente,



Dr. Ing. Qco. Adolfo Narciso Gramajo Antonio
Asesor
Colegiado: 264

Adolfo Gramajo
Ingeniero Químico
Colegiado 264



Guatemala, 30 de julio de 2018.
 Ref. EIQ.TG-IF.024.2018.

Ingeniero
 Carlos Salvador Wong Davi
 DIRECTOR
 Escuela de Ingeniería Química
 Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Wong:

Como consta en el registro de evaluación del informe final EIQ-PRO-REG-007 correlativo **050-2017** le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADUACIÓN
-Modalidad Seminario de Investigación-

Solicitado por la estudiante universitaria: **Roselin María Lucía del Cid Ruíz**.
 Identificada con número de carné: **3438 91794 0207**.
 Identificada con registro académico: **2014-03648**.
 Previo a optar al título de **INGENIERA QUÍMICA**.

Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE CLORO PROVENIENTE DE LA ALIMENTACIÓN DE COMBUSTIBLE ALTERNO EN EL HORNO DE LA LÍNEA DOS PARA LA FABRICACIÓN DE CLINKER EN UNA INDUSTRIA CEMENTERA

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por el Ingeniero Químico: **Adolfo Narciso Gramajo Antonio**.

Habiendo encontrado el referido informe final del trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

"ID Y ENSEÑADA A TODOS"

Licda. Ingrid Lorena Benitez Pacheco
 COORDINADORA DE TERNA
 Tribunal de Revisión
 Trabajo de Graduación



C.c.: archivo





Ref.EIQ.TG.024.2018

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del Trabajo de Graduación de la estudiante, **ROSELIN MARÍA LUCÍA DEL CID RUIZ** titulado: **“EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE CLORO PROVENIENTE DE LA ALIMENTACIÓN DE COMBUSTIBLE ALTERNO EN EL HORNO DE LA LÍNEA DOS PARA LA FABRICACIÓN DE CLINKER EN UNA INDUSTRIA CEMENTERA”**. Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.

“Id y Enseñad a Todos”

Ing. Carlos Salvador Wong Davi
Director
Escuela de Ingeniería Química

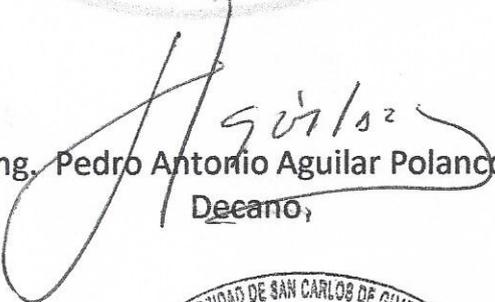
Guatemala, agosto de 2018 **FACULTAD DE INGENIERIA USAC**
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA
DIRECTOR

Cc: Archivo
CSWD/ale



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 DE CLORO PROVENIENTE DE LA ALIMENTACIÓN DE COMBUSTIBLE ALTERNO EN EL HORNO DE LA LÍNEA DOS PARA LA FABRICACIÓN DE CLINKER EN UNA INDUSTRIA CEMENTERA**, presentado por la estudiante universitaria: **Roselin María Lucía del Cid Ruiz**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano,

Guatemala, septiembre de 2018

/gdech



ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por ser mi fe, fuerza y esperanza; ante ti Señor están todos mis deseos, no te son un secreto mis anhelos. Mi logro es tuyo Señor.
Mis padres	Julio del Cid y Lesbia Ruíz, por su infinito amor, apoyo y motivación para lograr mis metas, gracias por su esfuerzo, los amo.
Mi hermana	Tania del Cid, por ser mi compañera de vida y quien me motiva a ser mejor cada día.
Mi novio	Julio Orellana, por ser mi mejor amigo quien me apoyó, motivó y acompañó durante el camino a mi meta, lo amo.
Mi abuela	María Luisa Aceituno, por haberme dado su amor, apoyo y consejo en cada paso de mi vida.
Mi familia	Tíos y primos, por haberme acompañado con su motivación y bendición en cada paso importante.
Mis amigos	Por haberme acompañado, ayudado y brindando su amor y apoyo en el camino a

cumplir una de las metas más importantes de mi vida.

AGRADECIMIENTOS A:

**Universidad de San
Carlos de Guatemala**

Por ser una fuente de conocimientos, experiencias, crecimiento personal y profesional, donde los sueños se vuelven realidad.

Facultad de Ingeniería

Por el conocimiento, la experiencia y el profesionalismo que me brindó para mi formación profesional.

Mi padre

Julio del Cid, por ser mi admiración y enseñarme a nunca tener miedo de intentar y de tener un no como respuesta.

Mi madre

Lesbia Ruíz, por siempre brindarme su apoyo, consejo y nunca haber dudado de mis sueños y capacidades.

Mis amigos

Vallery Carrera, Krisbell Orellana, Abdi Gil, Carlos Figueroa, Helen Escobar, Leslie Velázquez, Kathy Sazo y Barbara Cabrera, por haberme acompañado en cada paso y por hacer de esta experiencia única e inolvidable.

Mi asesor

Doctor Adolfo Gramajo, por compartir sus conocimientos, experiencias y el apoyo que me

brindó en la etapa final de mis estudios universitarios.

Mi coasesor

Alejandro Flores, por dedicar su tiempo y asesoría en la realización del presente estudio.

Mi revisora

Licda. Ingrid Benitez, por su dedicación y guía en la revisión del presente estudio.

Cementos Progreso S.A.

Por la oportunidad de ser parte de la familia Progreso y el apoyo recibido de los departamentos de producción, optimización, proverde, laboratorio de control de calidad y laboratorio proverde, en la realización del presente estudio.

**Escuela de Ingeniería
Química**

A mis catedráticos por los conocimientos, las experiencias y los consejos recibidos, muchas gracias.

**Departamento de
Matemática, Facultad
de Ingeniería, Usac**

Por la oportunidad que me brindó de tener mi primera experiencia laboral.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	XI
GLOSARIO	XIII
RESUMEN.....	XV
OBJETIVOS.....	XVII
HIPÓTESIS.....	XIX
INTRODUCCIÓN	XXI
1. ANTECEDENTES	1
2. MARCO TEÓRICO.....	5
2.1. Proceso de fabricación de cemento	5
2.2. Principios de fabricación de clinker	6
2.2.1. Etapas del tratamiento térmico en el sistema del horno	8
2.2.1.1. Secado	8
2.2.1.2. Deshidratación.....	9
2.2.1.3. Descarbonatación.....	9
2.2.1.4. Reacciones en estado sólido.....	9
2.2.1.5. Etapa de clinkerizado	9
2.2.1.6. Enfriamiento.....	10
2.3. Sistemas de combustión.....	10
2.4. Uso de combustibles alternativos	11
2.4.1. Combustible alternativo	12
2.4.2. Tipos de combustible alternativo	12

2.4.2.1.	Neumáticos fuera de uso (llanta).....	12
2.4.2.2.	Plásticos	13
2.4.2.3.	Líquidos.....	13
2.4.2.4.	Biomasa	13
2.4.3.	Consecuencias de la alimentación de combustibles alternativos	14
2.4.3.1.	Cambio de nivel de emisiones.....	14
2.4.3.2.	Influencia en la emisión de polvo	15
2.4.3.3.	Influencia en materias inorgánicas, elementos tóxicos.....	15
2.4.3.3.1.	Halógenos (Cl, F, Br)	15
2.4.3.4.	Gases inorgánicos.....	15
2.4.3.4.1.	SO ₂	16
2.4.3.4.2.	NO _x	16
2.4.3.4.3.	CO.....	16
2.4.4.	Beneficio de la alimentación de combustible alternativo.....	17
2.5.	Fenómenos de circulación	17
2.6.	Mecanismo del fenómeno de circulación	18
2.7.	Circulación de elementos en el sistema del horno	19
2.7.1.	Ingreso de elementos de circulación	19
2.7.1.1.	Concentraciones de ingreso por parte de la materia prima.....	19
2.7.1.2.	Concentraciones de ingreso por parte de los combustibles.....	20
2.7.2.	Zonas de formación de incrustaciones.....	20
2.7.3.	Salida de elementos circulantes.....	21
2.7.3.1.	Clinker	21
2.7.3.2.	Polvo del horno	22

2.7.4.	Ciclo del álcali.....	22
2.7.5.	Ciclo del azufre	23
2.7.6.	Ciclo del cloro	23
2.8.	Relación de álcali-cloro/azufre.....	24
3.	DISEÑO METODOLÓGICO	27
3.1.	Variables.....	27
3.1.1.	Variables independientes	28
3.2.	Delimitación de campo de estudio	28
3.2.1.	Obtención de los recursos de entrada	28
3.2.2.	Análisis fisicoquímico de las muestras	31
3.3.	Recursos humanos disponibles.....	31
3.4.	Recursos materiales disponibles (equipo, cristalería, reactivos).....	31
3.4.1.	Recursos materiales	31
3.4.2.	Especificaciones del equipo de muestreo.....	32
3.5.	Técnica cualitativa o cuantitativa	34
3.5.1.	Concentración de cloro base clinker	34
3.5.2.	Concentración de los gases en las emisiones de gases por la chimena.....	35
3.5.3.	Relación de álcali-cloro/azufre.....	35
3.5.4.	Cloro en clinker.....	36
3.5.5.	Comparación de cloro de harina caliente y cloro en clinker	36
3.5.6.	Representación gráfica de la concentración de cloro en función de óxido sulfúrico en harina caliente	37
3.5.7.	Metodología experimental de la toma de muestras.....	38

3.6.	Recolección y ordenamiento de la información.....	43
3.7.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información.....	51
3.8.	Análisis estadístico.....	56
3.8.1.	Media muestral o promedio.....	57
3.8.2.	Desviación estándar.....	57
3.8.3.	Análisis de varianza.....	58
3.9.	Plan de análisis de los resultados.....	58
3.9.1.	Métodos y modelos de los datos según tipo de variables.....	58
3.9.1.1.	Método para la realización de un balance álcali-cloro/azufre.....	58
3.9.2.	Programas para el análisis de datos.....	59
3.9.3.	Resultados del análisis estadísticos.....	59
4.	RESULTADOS.....	63
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	69
	CONCLUSIONES.....	75
	RECOMENDACIONES.....	77
	BIBLIOGRAFÍA.....	79
	APÉNDICES.....	81

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Óxidos principales en el clinker.....	6
2.	Fases mineralógicas del clinker	8
3.	Partes del horno rotatorio para la fabricación de clinker	10
4.	Clinker	11
5.	Ciclo de circulación interno en el sistema del horno	24
6.	Evaluación de la situación de incrustación.....	37
7.	Volumen de control del balance álcali-cloro/azufre	38
8.	Comparación de cloro en harina caliente y en clinker a 229,83 gramos de cloro por tonelada de clinker	65
9.	Comparación de cloro en harina caliente y en clinker a 265,73 gramos de cloro por tonelada de clinker	65
10.	Evaluación de óxido sulfúrico (SO ₃) y cloro en harina caliente a 229,83 gramos de cloro por tonelada de clinker	66
11.	Evaluación de óxido Sulfúrico (SO ₃) y cloro en harina caliente a 265.73 gramos de cloro por tonelada de clinker	67

TABLAS

I.	Propiedades algunos combustibles alternativos	14
II.	Límites de concentración de elementos circulantes.....	20
III.	Límites de concentración de combustible	20
IV.	Zonas de formación de incrustaciones.....	21
V.	Variables fijas en los balances álcali-cloro/azufre	27

VI.	Variables independientes de la investigación	28
VII.	Variables dependientes	28
VIII.	Puntos de muestreo del balance álcali cloro/azufre.....	29
IX.	Recursos materiales	31
X.	Especificaciones del equipo de muestreo.....	32
XI.	Equipo de experimentación	32
XII.	Equipo de análisis de en laboratorio	33
XIII.	Recursos generales	33
XIV.	Otros	33
XV.	Límites de entrada del sistema del horno	42
XVI.	Análisis de alimentación de harina cruda a 229,83 gramos de cloro por tonelada de clinker.....	44
XVII.	Análisis de harina caliente a 229,83 gramos de cloro por tonelada de clinker	44
XVIII.	Análisis de muestras de clinker a 229,83 gramos de cloro por tonelada de clinker.....	44
XIX.	Análisis de muestras del polvo del filtro a 229,83 gramos de cloro por tonelada de clinker.....	45
XX.	Análisis de muestras del combustible petcoke a 229,83 gramos de cloro por tonelada de clinker	45
XXI.	Análisis de muestras del combustible bunker a 229,83 gramos de cloro por tonelada de clinker	46
XXII.	Análisis de muestras del combustible alternativo a 229,83 gramos de cloro por tonelada de clinker.....	46
XXIII.	Monitoreo de emisiones de gases a 229,83 gramos de cloro por tonelada de clinker.....	47
XXIV.	Monitoreo flujos máxicos a 229,83 gramos de cloro por tonelada de clinker	47

XXV.	Análisis de alimentación de harina cruda a 265,73 gramos de cloro por tonelada de clinker	48
XXVI.	Análisis de harina caliente a 265,73 gramos de cloro por tonelada de clinker.....	48
XXVII.	Análisis de muestras de clinker a 265,73 gramos de cloro por tonelada de clinker	48
XXVIII.	Análisis de muestras del polvo del filtro a 265,73 gramos de cloro por tonelada de clinker	49
XXIX.	Análisis de muestras del combustible petcoke a 265,73 gramos de cloro por tonelada de clinker	49
XXX.	Análisis de muestras del combustible bunker a 265,73 gramos de cloro por tonelada de clinker	50
XXXI.	Análisis de muestras del combustible alternativo a 265,73 gramos de cloro por tonelada de clinker	50
XXXII.	Monitoreo emisiones de gases a 265,73 gramos de cloro por tonelada de clinker	51
XXXIII.	Monitoreo flujos másicos a 265.73 gramos de cloro por tonelada de clinker.....	51
XXXIV.	Concentraciones de entrada de óxido de potasio (K_2O), óxido de sodio (Na_2O), óxido sulfúrico (SO_3) y cloro a 229,83 gramos de cloro por tonelada de clinker	52
XXXV.	Concentraciones en clinker de óxido de potasio (K_2O), óxido de sodio (Na_2O), óxido sulfúrico (SO_3) y cloro a 229,83 gramos de cloro por tonelada de clinker	52
XXXVI.	Concentraciones de salida de óxido de potasio (K_2O), óxido de sodio (Na_2O), óxido sulfúrico (SO_3) y cloro a 229,83 gramos de cloro por tonelada de clinker	53
XXXVII.	Cloro en harina caliente en clinker en gramos de cloro por tonelada de clinker a 229,83 gramos de cloro por tonelada de clinker	53

XXXVIII.	Concentraciones de óxido sulfúrico (SO_3) y cloro en harina caliente a 229,83 gramos de cloro por tonelada de clinker	54
XXXIX.	Concentraciones de entrada de óxido de potasio (K_2O), óxido de sodio (Na_2O), óxido sulfúrico (SO_3) y cloro a 265,73 gramos de cloro por tonelada de clinker.....	54
XL.	Concentraciones en clinker de óxido de potasio (K_2O), óxido de sodio (Na_2O), óxido sulfúrico (SO_3) y cloro a 265,73 gramos de cloro por tonelada de clinker.....	55
XLI.	Concentraciones de salida de óxido de potasio (K_2O), óxido de sodio (Na_2O), óxido sulfúrico (SO_3) y cloro a 265,73 gramos de cloro por tonelada de clinker.....	55
XLII.	Cloro en harina caliente en clinker en gramos de cloro por tonelada de clinker a 265,73 gramos de cloro por tonelada de clinker	56
XLIII.	Concentraciones de óxido sulfúrico (SO_3) y cloro en harina caliente a 265,73 gramos de cloro por tonelada de clinker	56
XLIV.	Análisis de varianza para un factor conocido como ANOVA	60
XLV.	Experimentación de un factor para la concentración total de cloro que ingresa al sistema	61
XLVI.	Análisis de varianza de un factor para la concentración total de cloro que ingresa al sistema	61
XLVII.	Experimentación de un factor para la concentración total de cloro que egresa del sistema.....	61
XLVIII.	Análisis de Varianza de un factor para la concentración total de cloro egresa del sistema	62
XLIX.	Experimentación de un factor para la relación álcali-cloro/azufre en clinker	62
L.	Análisis de varianza de un factor para la relación álcali-cloro/azufre en clinker	62

LI.	Concentraciones de entrada y salida de óxido de potasio (K_2O), óxido de sodio (Na_2O), óxido sulfúrico (SO_3) y cloro a 229,83 gramos de cloro por tonelada de clinker	63
LII.	Concentraciones de entrada y salida de óxido de potasio (K_2O), óxido de sodio (Na_2O), óxido sulfúrico (SO_3) y cloro a 265,73 gramos de cloro por tonelada de clinker	63
LIII.	Relación álcali-cloro/azufre en clinker a 229,83 y 265,73 gramos de cloro por tonelada de clinker	64
LIV.	Comparación de cloro en harina caliente y en clinker a 229,83 y 265,73 gramos de cloro por tonelada de clinker	64
LV.	Evaluación de óxido sulfúrico (SO_3) y cloro en harina caliente a 229,83 y 265,73 gramos de cloro por tonelada de clinker.....	66

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
HCl	Ácido clorhídrico
Cl	Cloro
Cl H.M.	Cloro en harina caliente
%	Concentración porcentual masa-masa
GJ	Gigajoule
g	Gramo
gCl /T clinker	Gramo de cloro por tonelada de Clinker
h	Hora
Kg	Kilogramo
KJ	Kilojoule
Nm³	Metro cúbico normal
Mg	Miligramo
K₂O	Óxido de potasio
Na₂O	Óxido de sodio
SO₃	Óxido sulfúrico
ppm	Parte por millón
T	Tonelada métrica

GLOSARIO

AFR	<i>Alternative fuel resource</i> , que significa combustible alternativo.
Clinker	Piedra mineralógica con altas propiedades de resistencia que forma el principal componente del cemento.
Clinkerización	Proceso fisicoquímico desde la entrada de la harina cruda al sistema del horno hasta la salida del clinker al depósito de almacenamiento.
Cloro en clinker	Cantidad de cloro que es acumulado en el sistema por una diferencia de cloro entre la entrada y salida.
Combustible alternativo	Combustible derivado de preprocesamiento de material de desechos industriales o municipales.
Coprocesamiento	Proceso de conversión de combustible alternativo en fuente de energía.
Fenómeno de circulación	Circulación de componentes volátiles como el cloro dentro del proceso de clinkerización en el horNúm.

Harina caliente	Materia en intermedio del proceso de clinkerización que, principalmente, permite controlar la concentración de cloro.
Harina cruda	Material de alimentación al sistema de horno con las propiedades necesarias para obtener clinker de calidad.
Horno de clinker	Horno rotativo de forma cilíndrica donde realiza la fabricación de clinker en las industrias cementeras.
Polvo del filtro	Material con alta fineza que se obtiene en el proceso de filtrado de las emisiones de gases dentro del sistema del horNúm.
Preprocesamiento	Conversión de material de residuo o desecho industrial en combustible alternativo.
Relación álcali-cloro/azufre	Relación de la concentración de óxido de sodio, óxido de potasio, cloro y óxido sulfúrico.
Torre de ciclones	Separadores de material sólido-gas que cumple función de un intercambiador de calor dentro del sistema del horNúm.

RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo principal evaluar el impacto del cloro proveniente de combustibles alternos que alimentan al horno de la línea dos para la fabricación de clinker de la industria cementera Cementos Progreso S.A., ubicada en la Planta San Miguel del municipio de Sanarate, El Progreso, mediante la implementación del balance álcali-cloro/azufre.

Por consiguiente, se implementó una serie de muestreos a dos diferentes concentraciones de cloro en el combustible alternativo; estos estuvieron entre los límites de operación según la teoría utilizada en Cementos Progreso S.A.; en el proceso de investigación se determinaron las concentraciones de óxidos de sodio, óxido de potasio, cloro y óxido sulfúrico de cada flujo másico de entrada y salida del sistema del horno debido a que esto conformó el balance álcali-cloro/azufre.

Se evaluó que el impacto de cloro en el horno 462 es mayor al tener un incremento de combustible alterno; por lo tanto, la concentración de cloro en el sistema se incrementa de forma acumulativa, sin afectar la calidad y la relación álcali-cloro/azufre en clinker.

OBJETIVOS

General

Evaluar el impacto del cloro proveniente de la alimentación de combustible alterno en el horno de la línea dos para la fabricación de clinker en una industria cementera mediante la implementación del balance álcali-cloro/azufre.

Específicos

1. Determinar la concentración cloro en la entrada y salida del sistema del horno de la línea dos para la fabricación de Clinker a dos diferentes situaciones de suministro de combustible alternativo.
2. Determinar la relación álcali-cloro/azufre en clinker producido por el horno dos a diferentes concentraciones de cloro que es suministrado por parte de los combustibles alternativos.
3. Comparar la concentración de Cloro entre la harina caliente y la concentración de cloro en clinker en el sistema.
4. Evaluar la situación del sistema del horno mediante la representación gráfica de la concentración de cloro en función del óxido sulfúrico en harina caliente.

HIPÓTESIS

Hipótesis de investigación

La concentración de cloro en el ingreso y egreso del sistema del horno y las variables de evaluación varían significativamente al cambiar la concentración del cloro en el combustible alternativo que se suministra al proceso de clinkerización.

Hipótesis de alternativa

Hi, ₁: la concentración de cloro de ingreso al sistema del horno varía significativamente con respecto al cambio de la concentración del cloro proveniente del combustible alternativo.

Hi, ₂: la concentración de cloro de egreso del sistema del horno varía significativamente con respecto al cambio de la concentración del cloro proveniente del combustible alternativo.

Hi, ₃: la relación álcali/azufre en clinker del sistema varía significativamente con respecto al cambio de la concentración del cloro proveniente de combustible alternativo.

Hipótesis nula

Ho, ₁: la concentración del cloro de ingreso al sistema del horno no varía significativamente con respecto al cambio de concentración de cloro proveniente del combustible alternativo.

Ho, ₂: la concentración del cloro de egreso del sistema del horno no varía significativamente con respecto al cambio de la concentración del cloro proveniente de combustible alternativo.

Ho, ₃: la relación álcali/azufre en clinker del sistema no varía significativamente con respecto al cambio de la concentración del cloro proveniente de combustible alternativo.

INTRODUCCIÓN

El impacto del cloro en los hornos de fabricación de clinker es uno de los daños más costosos y perjudiciales en el proceso de producción y mantenimiento del equipo en las industrias cementeras, debido a que existe un ciclo de circulación interno que es provocado por los compuestos que se volatilizan aproximadamente a temperaturas de 1 200 °C y se condensan entre 800 °C; forma un circuito cerrado en el sistema, que ocasiona acumulación de materia, formación de costras, tapaduras en la torre de ciclones y obstáculos en la entrada al horno.

Se ha observado en estudios anteriores que una fuente significativa de cloro proviene del combustible alternativo formado por llantas, plásticos, biomasa, aceites y otros suministros de energía térmica al sistema; por lo tanto, un mayor consumo de combustibles alternativos constituye en una mejora en el desarrollo sostenible desde el punto de vista ambiental para el país; debido a que el sistema de emisiones de gases en los hornos es controlado y las temperaturas de cocción facilita la combustión de aquellos recursos energéticos que no son reciclables o reutilizables.

Se realizó un estudio que evalúa el impacto del cloro en los hornos de clinker a través de variables controladas, con la finalidad de aprovechar los recursos coprocesados en la operación del horno; debido a que a los recursos a los que usualmente se les llama basura, para el proceso de clinkerización son fuente de energía sostenible con el ambiente.

Uno de los efectos de la investigación sería disminuir el consumo de energía térmica derivada del petróleo. Por consiguiente, el presente estudio daría a Guatemala una forma de evaluar el uso eficiente del manejo de combustibles alternativos; además de generar nuevas ideas de control de las consecuencias que provoca el cloro en los equipos de producción y así generar un desarrollo sostenible en el futuro; por último, se invita al lector continuar con el documento presente.

1. ANTECEDENTES

El impacto del cloro en los hornos para la fabricación de clinker es uno de los problemas más relevantes de la industria cementera; estudios anteriores han revelado que la mayor fuente de cloro proviene de los combustibles alternos (AFR), los cuales son una alternativa viable para el suministro de energía térmica en el proceso de clinkerización debido a la opción de poder coprocesarlos. Los principales impactos en los hornos de las industrias cementeras es la formación de anillo por parte del azufre y corrosiones por parte del cloro. Por lo tanto, investigaciones anteriores revelan datos importantes sobre importantes como:

Los ensayos del laboratorio de E. Vogel según la investigación *Ciclos en el Sistema de hornos rotativos* realizada por H. Ritzmann en Neubeckum en 1971, muestra la atribución de álcalis, cloro y azufre en ciclos sobre la fluidez de la harina cruda a través de ensayos modelos con harina cruda humedecida dentro de un rango de temperaturas de 600 °C - 900 °C.

En la Universidad Autónoma de Nuevo León, la Facultad de Ciencias Químicas, Yadira González Carranza realizó un estudio para obtener el grado de maestría en Ciencias 1999 llamado *Caracterización de costras y anillos en los hornos rotatorios de cemento* donde se revela la composición química de los problemas de incrustación en los hornos proponiendo un método de análisis y una metodología de trabajo.

En el Estudio de factibilidad para el coprocesamiento de las aguas de sentina en plantas cementeras realizado por Denise Cajas Arenas y Marcos

Tapia Quincha de la Escuela Superior Politécnica de Litoral en Guayaquil, Ecuador en 2006, se expone el aprovechamiento de la energía térmica proveniente de los combustibles alternos y a la vez rectifica que los hornos de cemento son una excelente opción para el coprocesamiento de los residuos por sus características de funcionamiento y diseño.

La fundación de Investigación Científica e Industrial (SINTEF) de Oslo, Noruega en el estudio de *Formación, emisión y control de dioxinas en hornos de cemento* realizado por Kåre Helge Karstensen en el 2007 analiza el incremento de emisiones de PCDD/PCDFs por parte del coprocesado de residuos en los hornos de cemento; concluye que los hornos modernos con precalcinador parecen tener emisiones menores que los demás hornos de cemento convencionales.

En la investigación *Sulphur, spurrite and rings-always a headache for the cement klin operator?* realizada en Australia por Josef Nievoll, Susanne Jörg, Klaus Dösinger y Juan Corpus en 2007, confirma la existencia de sulfospurita ($2C_2S.CaSO_4$) en los anillos formados en los hornos y ciertas partes de los precalcinadores.

En la Universidad de Malawi-The Polytechnic República Dominicana se realizó una investigación *Alternative fuels in cement manufacturing* de Moses P.M. Chinyama en 2011 donde se expone una lista de combustibles alternativos que pueden sustituir a los combustibles convencionales; expone el potencial de cada tipo de combustible alternativo.

En la Universidad Politécnica de Valencia en España se realizó un estudio para optar al grado de licenciado en ciencias ambientales sobre la búsqueda y aplicaciones de combustibles alternativos para la industria cementera de la

comunidad de Valencia por parte de Miguel Santana Fernández en Gandía 2011; expone que las emisiones por parte de las harinas y los neumáticos cumplen con la legislación ambiental del país, porque son una propuesta sugestiva como fuente de energía térmica.

La revista electrónica de Medioambiente UCM editada por la Universidad Complutense de Madrid España en el 2012 realizó una investigación sobre la mejora del rendimiento en una cementera mediante el empleo de combustibles alternativo dirigida por A. López Díaz, C. Cobo Herrera, F. Blanco Silva, M. A. Gutiérrez García; concluye que la valorización energética de los combustibles alternos es una técnica de alimentación a los hornos, a la vez, eliminación de residuos una buena práctica de prevención de contaminación.

En la Universidad de Tecnología de Países Bajos se realizó una investigación *Optimal combustion to counteract ring formation in rotary kilns*, dirigida por Michele Pisaroni en 2012, donde se desarrollaron modelos numéricos sobre las combustiones óptimas con la finalidad de evitar la formación de anillos en los hornos rotatorios en zonas de alta temperatura.

En la Universidad de Tecnología de Polonia se realizó un estudio para optar al grado de doctorado de recursos naturales conocido como *Thermochemical characterisation of the gas circulation in the relevant cement industry processes*, realizado por Kamila Anna Armatys en 2013, que propone la utilización de Knudsen Effusion Mass Spectrometry (KEMS) como una herramienta para el estudio de gases de circulación dentro de los hornos donde se lleva a cabo el proceso de clinkerización.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Proceso de fabricación de cemento

En el proceso de producción del cemento portland consiste en una mezcla de minerales naturales los cuales son transformados en materiales sintéticos con altas propiedades hidráulicas, a través de la aplicación de temperatura, presión y un tiempo determinado.

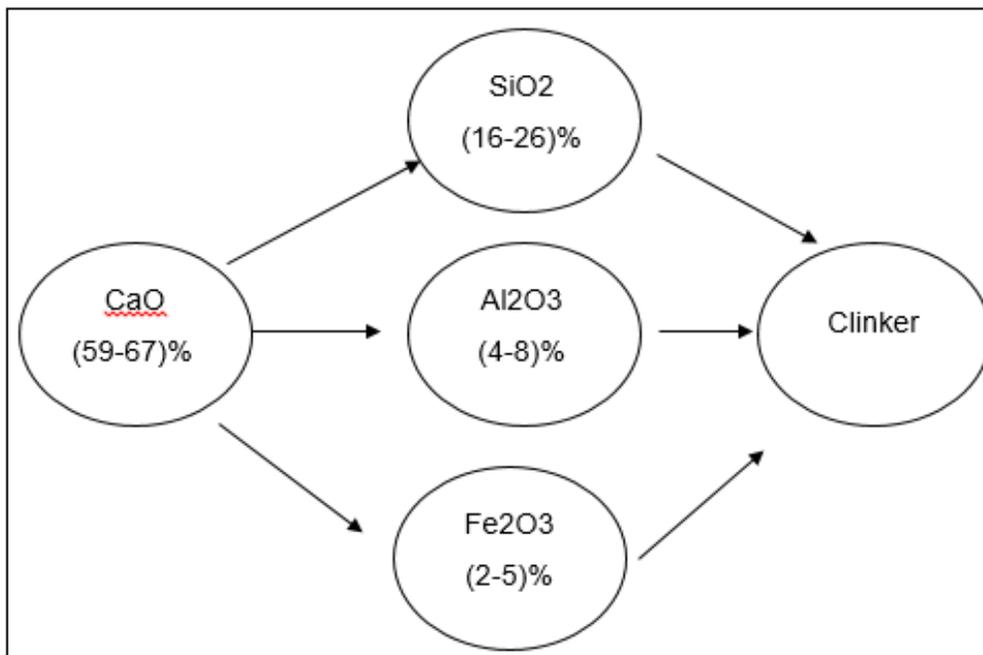
La materia prima para la producción de cemento deben ser minerales de origen natural con los principales compuestos inorgánicos: cal, óxido de silicio, hierro y aluminio. Cada uno de los componentes debe tener una proporción adecuada para la fabricación del cemento, por lo que las piedras más utilizadas son la caliza y esquisto. En la materia prima utiliza para la fabricación de cemento la caliza representa entre el 76 % - 80 % de los componentes principales. La fabricación de cemento consiste en dos procesos principales:

La reducción del tamaño del material que consiste en un proceso físico sin ningún cambio químico; además de la añadidura de aditivos de dosificación para la homogenización de materiales, con la finalidad de conservar todas sus propiedades fisicoquímicas y obtener las proporciones requeridas por el plan de calidad con la finalidad de garantizar la calidad de la producción.

El proceso de clinkerizado reside en la molienda y homogenización de una mezcla de materiales arcilloso, ricos en calcio (cal) y materiales de hierro y aluminio la cual recibe el nombre de harina cruda; además de un tratamiento térmico que conforma la transferencia de calor y masa conjuntamente con una

serie de reacciones físicas y químicas de los materiales para la formación de lo se conoce como clinker, el cual conforma aproximadamente más del 60 % del cemento.

Figura 1. **Óxidos principales en el clinker**



Fuente: elaboración propia.

2.2. Principios de fabricación de clinker

El proceso de transformación de las materias primas en clinker consiste en dos etapas: la desintegración de las estructuras originales y naturales de la harina cruda y la formación de nuevas estructuras en las que se encuentran diferentes productos intermedios de la reacción de clinkerización.

El proceso de clinkerizado abarca desde la entrada de la harina cruda al sistema del horno hasta la salida del clinker al depósito de almacenamiento.

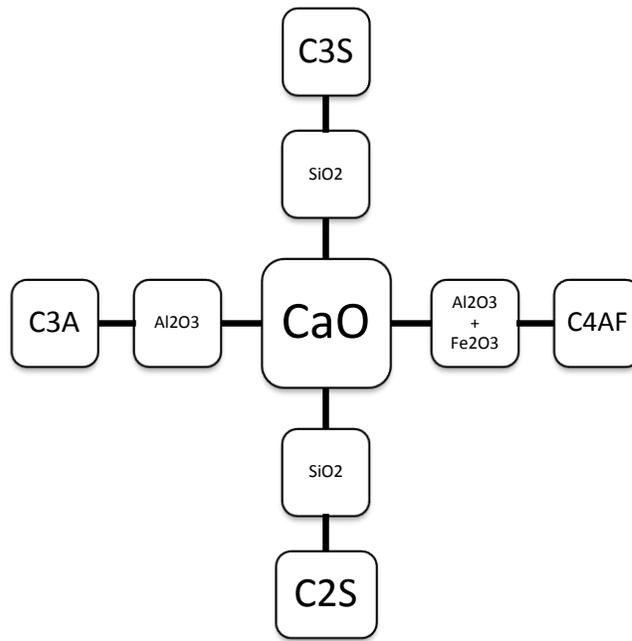
Mediante el tratamiento térmico, la mezcla de la harina cruda con los minerales primarios son transformados en cuatro estructuras químicas que son hidráulicamente activos conocidos como:

- Alita (silicato tricálcico) (C3S)
- Belita (silicato dicálcico) (C2S)
- Aluminato de tricálcico (C3A)
- Ferro-aluminato tetracálcico (C4AF)

La harina caliente está principalmente constituida por calcio, sílice, hierro, aluminio, magnesio y partes residuales como cloro, azufre a diferencia con mayores concentraciones los álcalis, azufre y cloro. Con una descarbonatación aproximada de 5 %. Esta es una composición intermedia entre la harina cruda y el clinker.

La formación de la alita se da entre la reacción de silicato dicálcico y óxido de calcio en fase líquida que está formada principalmente por aluminato tricálcico y ferroaluminato tetracálcico a una temperatura mayor de 1 250 °C. En la producción del clinker la formación de alita es garantizada por la existencia de la fase líquida en los mecanismos de reacción, los cuales aseguran sus propiedades hidráulicas. En el siguiente diagrama se muestra la composición química de los principales óxidos que forman el clinker.

Figura 2. Fases mineralógicas del clinker



Fuente: elaboración propia.

2.2.1. Etapas del tratamiento térmico en el sistema del horno

A continuación, se describen las etapas del tratamiento térmico en el sistema del horno.

2.2.1.1. Secado

Se realiza la eliminación del agua no combinada a temperaturas aproximadamente de 200 °C.

2.2.1.2. Deshidratación

Se elimina el agua adsorbida a temperaturas de entre 100 °C - 400 °C y el agua combinada con minerales arcillosos a 400 °C - 750 °C.

2.2.1.3. Descarbonatación

Consiste en la obtención del producto de óxido de calcio a través de la descomposición carbonato de calcio y liberación del gas dióxido de carbono entre temperaturas de 500 °C - 950 °C.

2.2.1.4. Reacciones en estado sólido

Estas reacciones toman lugar principalmente en el precalentador debido a que el tiempo que pasa por los ciclones es muy breve, el cambio de temperatura es muy acelerado. Provoca reacciones lentas a partir de 800 °C.

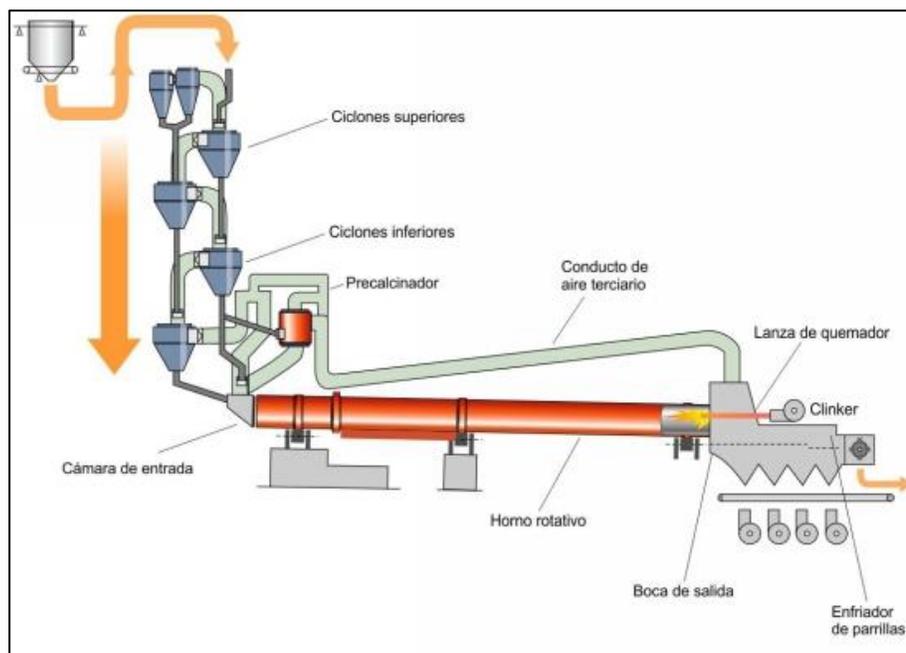
2.2.1.5. Etapa de clinkerizado

A partir de los 1 250 °C se empieza a formar la fase líquida que está conformada por las concentraciones menores de magnesio, potasio y sodio; luego, se tiende a formar silicato de cálcico y silicato tricálcico y los restantes minerales sintéticos de aluminato tricálcico y ferroaluminato tetracálcico se forman a través de la solidificación de la fase líquida.

2.2.1.6. Enfriamiento

Es la última etapa del proceso de clinkerizado, pasando el clinker por temperaturas de 1 450 °C a aproximadamente 200 °C, con la finalidad de revertir la reacción de formación del silicato tricálcico y permitir la cristalización de la fase en aluminato y ferrita.

Figura 3. Partes del horno rotatorio para la fabricación de clinker



Fuente: *Industria del cemento*. http://www.sensotec.com.ar/industria_cemento.php. Consulta: 11 de septiembre de 2017.

2.3. Sistemas de combustión

Dentro del horno se realiza el proceso de transformación de la harina cruda, principalmente caliza y marga descarbonatada en silicato tricálcico, silicato dicálcico, aluminato tricálcico y ferroaluminato tetracálcico lo que

constituye el clinker a temperaturas aproximadas de 1 500 °C; este es el componente base para la producción de cemento portland gris.

Figura 4. **Clinker**



Fuente: *Cement Kilns*. http://www.cementkilns.co.uk/ck_clinker.html. Consulta: 17 de septiembre de 2017.

Para alcanzar las reacciones de descarbonatación, entre sólidos y de sinterización, se requiere de una temperatura elevada por lo que es necesario el suministro de energía al sistema, proveniente dicha energía del combustible primario petcoque y *fuel oil*. El *fuel oil* es utilizado para el arranque del horno y una vez se tenga la temperatura suficiente se mantiene con la alimentación del molino de petróleo a una granulometría muy fina.

2.4. Uso de combustibles alternativos

La utilización de combustibles alternativos resulta ser un importante factor en la industria cementera, debido a las condiciones de operación de los hornos ya que ofrecen la eficiente eliminación de desechos sin adicionar emisiones ni ningún tipo de productor sólido.

2.4.1. Combustible alternativo

“Son fuentes de energía derivados de otros recursos además del petróleo. Por lo tanto, la valoración energética de residuos producidos en diferentes procesos industriales forma parte de una de las realidades de Guatemala, debido a que en otros países europeos la utilización de combustible alternativo como fuente de energía ya es una realidad, con sustituciones aproximadas del 40% - 50 % de la fuente de energía primaria”¹.

Se debe tomar en consideración que no todos los residuos son aptos para ser suministro de energía en los hornos para la fabricación de Clinker: residuos radioactivos. Una de las condiciones principales para utilizar el residuo como combustible alternativo es que puedan ser homogenizados en sus propiedades químicas y físicas junto con otros tipos de materiales no reciclables con la finalidad de asegurar una buena combustión en el interior del horno.

2.4.2. Tipos de combustible alternativo

Los residuos que se pueden valorizar como fuente de energía segura en la industria cementera se pueden encontrar:

2.4.2.1. Neumáticos fuera de uso (llanta)

Al finalizar la vida útil del neumático, es posible reutilizarlo reconstruyendo su banda rodadura con la finalidad de introducirlos de nuevo al mercado; de igual manera, separando los refuerzos metálicos y convirtiéndolo en polvo de caucho. Pero la reutilización del neumático es totalmente factible debido a sus

¹ LÓPEZ DIAZ, A. y otros. *Mejora de rendimiento en una cementera mediante el empleo de combustibles alternativos*. p. 103.

propiedades elásticas, por lo que quedan a disposición de utilización de fuente de energía en la industria cementera. El neumático dispone de un poder calorífico relativamente alto aproximadamente de 7 600 Kcal/Kg, y como otra ventaja es que no es necesaria la separación de las estructuras metálicas.

2.4.2.2. Plásticos

La utilización de plásticos como fuente de energía reside principalmente en plásticos no reciclables, ligeros y cuyo destino hubiera sido un vertedero. Una de las principales consecuencias de suministrar plásticos a los hornos es el aporte de gases producto de la combustión de ácido clorhídrico con componentes orgánicos los cuales pueden producir productos tóxicos provenientes de dioxinas y furanos. Además, por las altas temperaturas de combustión, en el interior del horno no se producen problemas ambientales.

2.4.2.3. Líquidos

La utilización de líquidos requiere un tratamiento previo de homogenización para asegurar la correcta combustión en el interior del horno con la finalidad de no producir gases no deseables; además, son bastante utilizados debido a su alto poder calorífico: disolventes, aceites usados, barnices, entre otros.

2.4.2.4. Biomasa

Es un combustible alternativo obtenido de materia orgánica como: restos de deforestación, cartones, papeles, restos de la industria de madera, lodos depurados. En cuanto a los cartones y papeles, se utilizan aquellos recursos

que no sean reciclables debido a los altos niveles de tinta de colores ya que el costo para reutilizarlo sería más elevado que producir material nuevo.

Con respecto a los lodos depurados se han evaluado riesgos en la utilización como fuente de energía ya que producen emisiones de gases principalmente por dióxido de carbono, pero las emisiones son menores que las producidas por los combustibles fósiles.

Tabla I. **Propiedades algunos combustibles alternativos**

Núm.	Compuesto	%Cloro (Cl)	Poder calorífico (J/g)
1	Neumático	0,40	37 904
2	Mezcla de plástico	3,78	41 585
3	Líquidos	0,23	32 439
4	Descaste orgánico	5,92	18 164
5	Papel	0,38	15 119

Fuente: elaboración propia.

2.4.3. Consecuencias de la alimentación de combustibles alternativos

A continuación, se describen las consecuencias de la alimentación de combustibles alternativos.

2.4.3.1. Cambio de nivel de emisiones

Cada tipo de combustible alternativo suministrado en el interior del horno puede producir ciertos cambios en los niveles de emisiones de gases por lo que depende de:

- Tipo de residuo
- Propiedades físicas
- Propiedades químicas
- Tipo de horno: la cantidad de gas expulsado y los niveles de temperatura
- Método de alimentación al horno
- Carga de alimentación y el porcentaje de sustitución
- Nivel normal de emisión sin la combustión de residuos

2.4.3.2. Influencia en la emisión de polvo

La combustión de residuos puede producir la recolección de polvo, por lo que este efecto es observado para el suministro de los diferentes tipos de combustible alterNúm.

2.4.3.3. Influencia en materias inorgánicas, elementos tóxicos

2.4.3.3.1. Halógenos (Cl, F, Br)

Las emisiones de estos gases provocan daños o incrustaciones en el sistema del horno, por lo que se tienen ciertos niveles de control para su alimentación. La incorporación de cloro en especial es limitada restringiéndose a cantidades menores de 0,2 g Cl/kg Clinker.

2.4.3.4. Gases inorgánicos

A continuación, se describen los gases inorgánicos que afectan a los combustibles alternativos.

2.4.3.4.1. SO₂

La relación entre álcalis y azufre indica el potencial para quemar desechos que contenga azufre. Las principales fuentes de ingreso son la materia prima, combustible y los residuos, pero se puede contrarrestar el efecto con una suficiente alimentación de álcalis en forma de óxido de sodio y óxido de potasio.

2.4.3.4.2. NO_x

La principal fuente de nitrógeno de la combustión del combustible convencional y otra parte proviene de los combustibles alternativos. La experiencia de la industria cementera indica una disminución en la emisión de gases NO_x al suministrar los residuos como alimentación secundaria.

2.4.3.4.3. CO

La formación de monóxido de carbono es desfavorable para las condiciones de combustión en el interior del horno, lo cual se puede dar por diferentes causas:

- Tamaño de partícula
- Distribución de la alimentación de combustible
- Temperatura de combustión
- Suministro de oxígeno
- Tiempo de residencia

El suministro de combustibles alternativos como fuente secundaria produce grandes emisiones de monóxido de carbono especial si son grumos o grano grueso, además de la baja temperatura de combustión en esa zona.

2.4.4. Beneficio de la alimentación de combustible alternativo

En la industria cementera el alto gasto energético utilizado para la descarbonatación o producción de energía eléctrica, los costos de los combustibles y la energía eléctrica pasado a significar entre el 28 % y 40 % de los costos de fabricación, por lo que la reducción de costos en el consumo de energía es uno de los principales temas a tratar.

Por lo que la diversificación de fuentes energéticas son factores clave para la competitividad del sector cementero, además de la reducción de residuos no amigables con el medio ambiente. Por último, el suministro de combustibles alternos en los hornos no causa daños a la salud del ser humano, debido a que no empeora las emisiones del proceso fabril del clinker.

2.5. Fenómenos de circulación

Si el suministro de materia prima, combustibles (alternativo y convencional), contiene un exceso de componentes volátiles como:

- Óxido sulfúrico (SO_3)
- Óxido de potasio (K_2O)
- Óxido de sodio (Na_2O)
- Cloro (Cl)

Estos componentes causan problemas principalmente en la operación del horno como:

- Bloqueo de ciclones, ductos para el paso de harina cruda, inestabilidad en el sistema de alimentación, depósitos en la cámara de transición,

forma costras o anillos en el horno rotatorio, polvo en circulación, corrosión y un aumento de temperatura.

- Aumenta el contenido de álcali en el clinker.
- Aumentan las emisiones de gases como óxido sulfuroso (SO_2) en las chimeneas.

2.6. Mecanismo del fenómeno de circulación

Dependiendo del grado de volatilidad, la circulación de elementos volátiles provenientes de zonas de sintonización del sistema del horno provoca la disminución de temperaturas; resulta la condensación sobre la materia prima y cierta parte son adheridos a las paredes. Luego, los elementos condensados que van mezclados con la materia prima de alimentación regresan a zonas de sinterización donde son revolatilizados.

Finalmente, los ciclos deben buscar un equilibrio en la salida de los elementos como en la entrada por medio de la materia prima y los combustibles; como resultado los elementos salen del sistema con el clinker, una vez la concentración de los elementos volátiles sea controlada.

Si la concentración de los elementos volátiles es muy elevada, se debe integrar un *bypass* que será necesario para la extracción de los elementos de circulación en el sistema. Una muy pequeña parte de los elementos volátiles dejan el horno a través del gas del polvo, por lo que es necesario la precipitación de las partículas de polvo disperso con el objetivo de reintroducirlo al sistema del horno; este proceso es más conocido como el ciclo externo de elementos de circulación.

2.7. Circulación de elementos en el sistema del horno

2.7.1. Ingreso de elementos de circulación

Las principales entradas de elementos de circulación son por materias primas y combustibles; cada una de las concentraciones de ingreso por parte de los elementos de circulación tienen un rango establecido para evitar los problemas por incrustaciones, formaciones de anillos o atascos, también, el manejo de los perfiles de temperatura, la realización de una combustión completa, el grado de oxígeno suministrado y el grado de precalentamiento entre otras cosas.

2.7.1.1. Concentraciones de ingreso por parte de la materia prima

Harina cruda está constituida por óxido de sodio y potasio, cationes ingresados a través de la caliza y el esquisto. El azufre es introducido mediante diferentes formas mineralógicas: sulfato de calcio rehidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), sulfato de calcio (CaSO_4) y pirita (FeS_2).

El cloro es principalmente introducido en forma de cloruro de sodio (fuente del agua del mar) o como cloruro de potasio, principalmente, proveniente de la alimentación de combustible alterNúm.

Para cada uno de los elementos circulantes existen límites de concentración que debe llevar la harina cruda para disminuir sus efectos negativos.

Tabla II. **Límites de concentración de elementos circulantes**

Elemento	Límite inferior (%)	Límite superior (%)
Cloro (Cl)	0,02	0,05
Óxido sulfúrico (SO ₃)	0,5	1,25
Óxido de potasio (K ₂ O)	1,0	1,5
Óxido de sodio (Na ₂ O)	La volatilidad es bastante baja y no causa problemas de incrustación.	

Fuente: elaboración propia.

2.7.1.2. Concentraciones de ingreso por parte de los combustibles

Tabla III. **Límites de concentración de combustible**

Elemento	Límite inferior (%)	Límite superior (%)
Carbón	1,5	3,0
Petcoke	2,0	4,0
Fuel oil	2,5	5,0

Fuente: elaboración propia.

2.7.2. Zonas de formación de incrustaciones

Dependiendo de la singularidad de los elementos circulantes, su punto de condensación toma lugar entre los 650 °C y 1 000 °C. La condensación de los elementos clorados esta entre los 650 °C y 800 °C, mientras que la condensación de los sulfatos y sus componentes está entre 800 °C y 1 000 °C.

Las zonas de formación de incrustaciones dependen tanto de los elementos de circulación como del sistema de manejo del horno; en el siguiente recuadro se muestran las zonas de incrustaciones por parte del cloro y sulfatos.

Tabla IV. **Zonas de formación de incrustaciones**

Partes del sistema del horno	Zonas de incrustación
Precalcinador, etapa ciclón 4 o ciclón 5	Partes más bajas del ciclón, ductos ascendente, área de entrada al horno (primera sección rotativa del horno)
Etapa 3, ciclón 3	Parte más baja del ciclón, ducto de ascenso, área de entrada
Etapa 2, ciclón 2	Parte más baja del ducto de ascenso, área de entrada
Zona de calcinación	A través de la zona de calcinación

Fuente: elaboración propia.

2.7.3. Salida de elementos circulantes

2.7.3.1. Clinker

El cloro es un elemento muy volátil, por lo tanto, es difícil hacerlo salir a través del clinker. En casos excepcionales, cuando la zona de sinterización se ha enfriado en gran medida o se han formado grandes grumos de masa, el cloro puede dejar el horno en mayores cantidades. Normalmente el cloro puede ser extraído en grandes cantidades del sistema del horno por medio de un *bypass*.

Los álcalis y el azufre dejan el sistema del horno normalmente a través de la vía del clinker, a través de los siguiente componentes: K_2SO_4 , $K_3Na(SO_4)_2$, Na_2SO_4 , $Ca_2K_2(SO_4)_3$ y raramente en Ca_2SO_4 . En la solución sólida del clinker salen los minerales de potasio (K) en belita y aluminita, sodio (Na) en aluminita y óxido sulfúrico (SO_3) en belita.

2.7.3.2. Polvo del horno

Es otra de las alternativas de salida de elementos circulantes, a través de la vía externa. La cantidad de componentes volátiles en el ciclo externo del horno depende de las condiciones de operación del horno, las concentraciones típicas de los elementos en el filtro de polvo de los gases de escape del horno. Aproximadamente, la concentración de álcalis debería estar entre el 3 %, de óxido de azufre del 5 % y de cloro entre el 7 %.

2.7.4. Ciclo del álcali

Los componentes alcalinos que escapan del material de carga y son principalmente disociados y no disociados en forma de gas caliente del horno. La principal disociación de los álcalis reacciona en partes frías del horno y bajas condiciones oxidantes, con los óxidos de azufre, dióxido de carbono y cloro que están igualmente presentes en los gases del horno. Por resultado sulfatos de álcalis, carbonatos y cloruros formados.

Los lugares de condensación de los álcalis van acorde de los componentes formados en diferentes zonas. Los sulfatos alcalinos se condensan principalmente en la entrada del horno y dentro del horno, mientras que los cloruros y carbonatos son acumulados en zonas de transición y precalentamiento.

Los elementos volátiles por parte del sodio son considerados menos que por parte del potasio, debido a que presenta mayores acumulaciones el potasio que el sodio combinado con sulfatos.

2.7.5. Ciclo del azufre

Mediante la vaporización del azufre a temperaturas de la zona de combustión en el horno de cemento, el dióxido de azufre es el componente predominante. Al alejarse de la zona de combustión reaccionan con los álcalis en una fase gaseosa presente en la carga de materia formando sulfatos alcalinos como producto. Al haber una cantidad suficiente de álcalis para reaccionar con los óxidos de azufre, estos en fase gaseosa precipitan sobre el material. Los sulfatos del álcali circulan a través del horno, pasando por la zona de sinterización y son principalmente descargados con el clinker.

La formación de los sulfatos alcalinos se ve influenciado por las emisiones de dióxido de azufre. Al incrementarse el exceso molar de dióxido de azufre sobre la concentración de álcalis de la entrada provoca grandes emisiones de óxido sulfuroso en la fase gaseosa.

El dióxido de azufre es principalmente considerado en forma de sulfato de calcio. Juntos, el óxido de calcio y el carbonato de calcio, están disponibles para la reacción de sulfato de calcio.

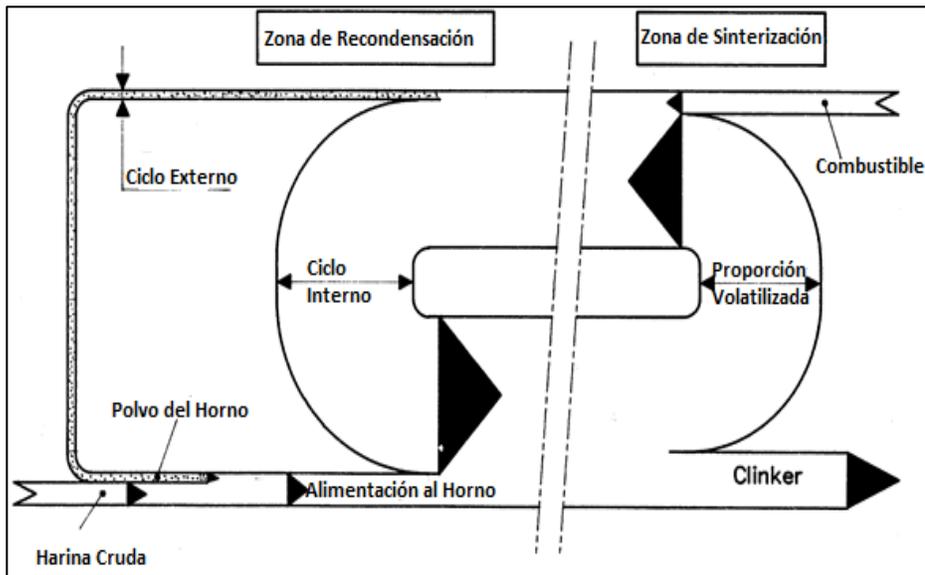
La reacción de dióxido de azufre con el óxido de calcio toma lugar principalmente en el horno y la reacción con carbonato de calcio se da principalmente en el precalentador.

2.7.6. Ciclo del cloro

El cloro es liberado durante el calentamiento del material y la combustión de los combustibles el cual reacciona con los álcalis formando cloruros alcalinos. Esta reacción toma lugar en la carga del material o después de la

vaporización en los gases del horno. Los cloruros alcalinos en estado gaseoso se dan a altas temperaturas y se solidifican a temperaturas más bajas como en las partes las frías del sistema del horno.

Figura 5. **Ciclo de circulación interno en el sistema del horno**



Fuente: *Best available techniques for the cement industry*. <http://www.ztch.umcs.lublin.pl/materialy/batcement.pdf>. Consulta: 18 de agosto de 2017.

2.8. Relación de álcali-cloro/azufre

La relación molar entre álcalis menos cloro con respecto a la concentración de azufre que está representando por la siguiente ecuación.

$$\frac{A-C}{S} = \frac{\sum Alk_2O - Cl_2}{SO_3} \quad [Ec.1]$$

Permite la caracterización de los problemas de álcali, azufre y cloro. La expectativa de los rangos de volatilidad y la naturaleza de los álcalis en el clinker.

La extracción del cloro en forma de álcali es basada en que el cloro reacciona completamente con los álcalis. Y que el denominador es principalmente incluido por el azufre proveniente de los combustibles.

3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1. Variables

Tabla V. Variables fijas en los balances álcali-cloro/azufre

Núm.	Valor	Unidad	Descripción
1	Tiempo de realización	horas	El tiempo de realización del balance álcali-cloro/azufre.
2	Alimentación de harina cruda	T/h	Las toneladas de harina cruda por hora alimentadas al horNúm.
3	Alimentación de combustible petcoke	T/h	Las toneladas de petcoke por hora que son alimentadas al horNúm.
4	Alimentación de combustible bunker	T/h	Las toneladas de bunker por hora que son alimentadas al horNúm.
5	Alimentación de combustible alternativo	T/h	Las toneladas de Bunker por hora que son alimentadas al horno
6	Salida de clinker del horno	T/h	Las toneladas de clinker por hora que son egresadas del horNúm.
7	Salida de polvo del filtro del horno	T/h	Las toneladas de polvo del filtro por hora que son egresadas del horNúm.

Fuente: elaboración propia.

3.1.1. Variables independientes

Tabla VI. Variables independientes de la investigación

Núm.	Variable	Unidad	Descripción
1	Concentración de cloro en los combustibles alternos	%m/m	Porcentaje masa-masa de cloro base clinker.
2	Concentración de azufre en los combustibles alternos	%m/m	Porcentaje masa-masa de óxido sulfúrico base clinker.

Fuente: elaboración propia.

Tabla VII. Variables dependientes

Núm.	Variable	Unidad	Descripción
1	Concentración de cloro que ingresa al horno	%m/m base clinker	Depende de la cantidad de cloro que ingresa por parte de los combustibles alternos.
2	Concentración de cloro que egresa al horno	%m/m base clinker	Depende de la cantidad de cloro que ingresa al sistema.
3	Relación álcali-cloro/azufre en clinker	No aplica	Depende de las concentraciones de óxido de sodio, óxido de potasio, óxido de azufre y cloro en clinker.
4	Relación cloro harina cruda/ cloro de ingreso	No aplica	Depende de la concentración de ingreso de cloro y de la misma en harina caliente.
5	Relación entre cloro/azufre en harina caliente	No aplica	Depende de la concentración de cloro y óxido sulfúrico de la harina caliente y clinker.

Fuente: elaboración propia.

3.2. Delimitación de campo de estudio

3.2.1. Obtención de los recursos de entrada

Se obtendrá de las muestras de los puntos de muestreo que se presentan a continuación.

Tabla VIII. Puntos de muestreo del balance álcali cloro/azufre

Núm.	Puntos de muestreo	Descripción	Fotografía del punto de muestreo
1	Alimentación al horno 462 harina cruda	Descarga de la alimentación horno 462	
2	Harina cruda caliente	Toma de muestra harina caliente horno 462	
3	Polvo del filtro	Polvo del filtro clinke, último gusano, horno 462	
4	Clinker	Descarga de clinker horno 462	

Continuación de la tabla VIII.

5	Combustible Primario	Petcoke fino, horno 462	
6	Combustible secundario (bunker)	Cuarto de bombas pilaricas	
7	Combustible alternativo	Banda transportadora de combustible alterno, horno 462	

Fuente: elaboración propia.

3.2.2. Análisis fisicoquímico de las muestras

Los análisis fisicoquímicos para la obtención de la concentración de óxido de sodio (Na_2O), óxido de potasio (K_2O), azufre (S) y cloro (Cl) se obtuvieron por medio del Laboratorio de Control de Calidad y Proverde de la Planta San Miguel de Cementos Progreso en Sanarate, El Progreso, Guatemala.

3.3. Recursos humanos disponibles

- Investigador: Br. Roselin María Lucía del Cid Ruíz.
- Asesor: Dr. Adolfo Gramajo Antonio.
- Asesores internos en Cementos Progreso: Ing. Alejandro Flores y Equipo de Optimización, Producción y Proverde.
- Colaboradores internos.

3.4. Recursos materiales disponibles (equipo, cristalería, reactivos)

3.4.1. Recursos materiales

Tabla IX. Recursos materiales

Materia prima	Harina cruda
	Harina caliente
	Polvo del filtro de clinker
	Bunker
	Clinker
	Petcoke
	Combustible alternativo (mezcla de sólidos)
Reactivos	Carbonato de sodio

Fuente: elaboración propia.

3.4.2. Especificaciones del equipo de muestreo

Tabla X. Especificaciones del equipo de muestreo

	Tipo de material a muestrear	Frecuencia de muestreo	Instrumento para muestreo	Identificación del recipiente para almacenar la muestra
Horno 462	<ul style="list-style-type: none"> • Petcoke • Alimentación harina cruda • Harina Caliente • Combustible alternativo • Bunker • Clinker • Polvo del Filtro 	1 por hora	<ul style="list-style-type: none"> • Sacamuestra • Sacamuestra • Recipiente para harina caliente • Llanta • Coliguasa • Pala • Sacamuestra 	<ol style="list-style-type: none"> 1. COKE-L41-#número de muestra (según horario) 2. ALIM-462-#número de muestra (según horario) 3. H.M-462-#número de muestra (según horario) 4. AFR #número de muestra (según horario) 5. BUNK-462-#número de muestra (según horario) 6. CLIN-462 #número de muestra (según horario) 7. FILTRO- 462 #número de muestra(según horario)

Fuente: elaboración propia.

Tabla XI. Equipo de experimentación

Equipo	Horno 462, Planta San Miguel, Cementos Progreso S. A.
---------------	---

Fuente: elaboración propia.

El procedimiento con que se realizó el análisis de laboratorio se basó en la utilización de los siguientes equipos. La metodología estuvo estipulada por los reglamentos internos del Laboratorio de Control de Calidad y Proverde de la Planta San Miguel de Cementos Progreso S.A.

Tabla XII. **Equipo de análisis de en laboratorio**

Equipo	Perladora automática marca Claise
	Molino de pulverización Robolab
	Analizador de fluorescencia de rayos X (XRF)
	Analizador de gases en chimenea
	Bomba calorimétrica IKA
	Analizador LECO
	Electrodo IKA de cloro
	Balanza analítica
Analizador de gases	

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIII. **Recursos generales**

Útiles de oficina	Papel bond
	Lapiceros
	Marcadores
	<i>Masking tape</i>
	Cuaderno de bitácora
	Engrapadora
	Cartucho para tinta
Vestimenta de seguridad	Uniforme de seguridad cementos progreso
	Botas punta de acero
	Casco
	Tapones auditivos
	Lentes de seguridad
	Mascarilla de sólidos y gases
Guantes de cuero	

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIV. **Otros**

Otros	Electricidad
	Impresora
	Cronómetro
	Cámara de teléfono celular
	Bolsas de toma de muestra

Fuente: elaboración propia.

3.5. Técnica cualitativa o cuantitativa

La técnica que se utilizó para la realización del experimento fue cuantitativa, debido a partir del procedimiento para la realización del balance álcali-cloro/azufre se desarrollaron los datos para la evaluación del estudio.

3.5.1. Concentración de cloro base clinker

El porcentaje masa-masa del componente x en función del flujo másico de clinker producido.

$$x_i = x_0 \frac{m_o}{m_i}$$

[Ec. 2]

Donde:

- x_i : porcentaje masa-masa de componente x en función del flujo másico de clinker producido (%m/m).
- x_0 : porcentaje masa-masa de componente x función de un flujo másico diferente del clinker producido (%m/m).
- m_i : Flujo másico de clinker producido (T/h).
- m_o : Flujo másico diferente del clinker producido (T/h).

3.5.2. Concentración de los gases en las emisiones de gases por la chimena

Se terminó la concentración de cloro y óxido sulfúrico en base seca que se emitió en los gases al ambiente de la siguiente forma.

$$c_{seca,i} = c_{humeda,i} * (0,27 + \frac{C.T.}{1\ 000} * 25) * \frac{(21)}{(21 - O_2 * P.C.)}$$

Donde:

- c_{seca} : concentración del compuesto i en base seca (mg/ kg Clinker)
- c_{humeda} : concentración del compuesto i en base húmeda (mg/Nm³)
- O_2 : porcentaje de oxígeno que sale por la chimenea (%)
- $C.T.$: cantidad de energía que se suministró al horno (kJ/kg)

3.5.3. Relación de álcali-cloro/azufre

La relación molar entre álcalis menos cloro con respecto a la concentración de azufre que está representando por la siguiente ecuación.

$$\frac{A-C}{S} = \frac{\frac{Na_2O}{64} + \frac{K_2O}{92} - \frac{Cl}{70}}{\frac{SO_3}{80}} \quad [\text{Ec. 3}]$$

Donde:

- Na_2O : porcentaje masa-masa de óxido de sodio en base clinker
- K_2O : porcentaje masa-masa de óxido de potasio en base clinker
- Cl : porcentaje masa-masa de cloro en base clinker
- SO_3 : porcentaje masa-masa de óxido sulfúrico en base clinker

3.5.4. Cloro en clinker

El cálculo de cloro en clinker es la cantidad de cloro que pasa a través de la zona de clinkerización la concentración de cloro en clinker debe estar entre 200-300 g Cl/ton Clin.

$$Cl_{Clinker} = Cl_{Total\ entrada} - Cl_{Polvo\ del\ filtro} - Cl_{Emisiones\ de\ gases} \quad [Ec. 4]$$

Donde:

- $Cl_{Total\ entrada}$: cantidad de cloro que ingresa al sistema base clinker (%m/m).
- $Cl_{Polvo\ del\ filtro}$: cantidad de cloro en el polvo del filtro base clinker (%m/m).
- $Cl_{Emisiones\ de\ gases}$: cantidad de cloro que es emitido por el ácido clorhídrico en los gases de la chimenea (%m/m).

3.5.5. Comparación de cloro de harina caliente y cloro en clinker

La relación entre la concentración de cloro de harina caliente y cloro que ingresa al sistema.

$$Cl_{HM} = Cloro_{clinker} * 50 \quad [Ec. 5]$$

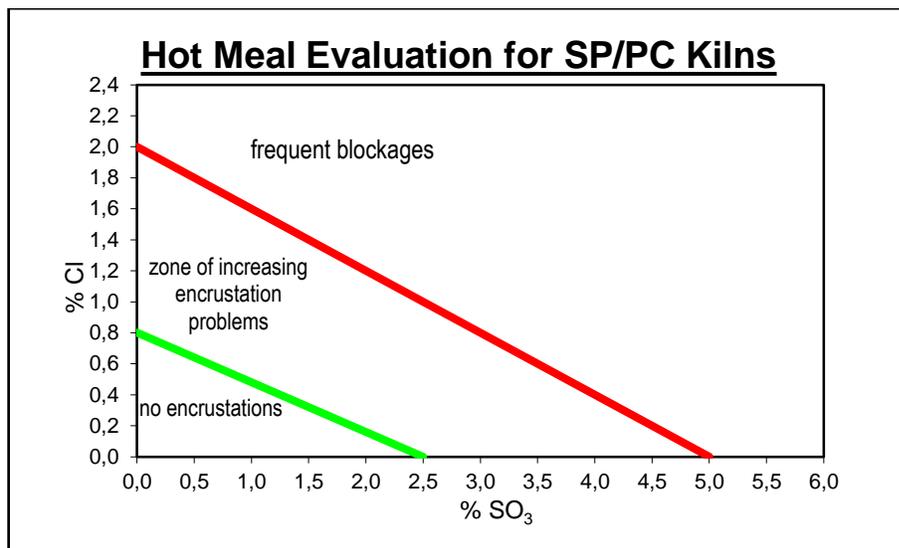
Donde:

- C_{In} : porcentaje masa-masa de cloro en clinker (gCl/T clin).
- C_{HM} : porcentaje masa-masa de elementos volátiles en harina caliente en base clinker (gCl/T clin).

3.5.6. Representación gráfica de la concentración de cloro en función de óxido sulfúrico en harina caliente

Se representó el resultado a través de la siguiente gráfica que evalúa la situación del sistema del horno en función de las dos variables de la concentración de cloro y óxido sulfúrico en harina caliente.

Figura 6. Evaluación de la situación de incrustación

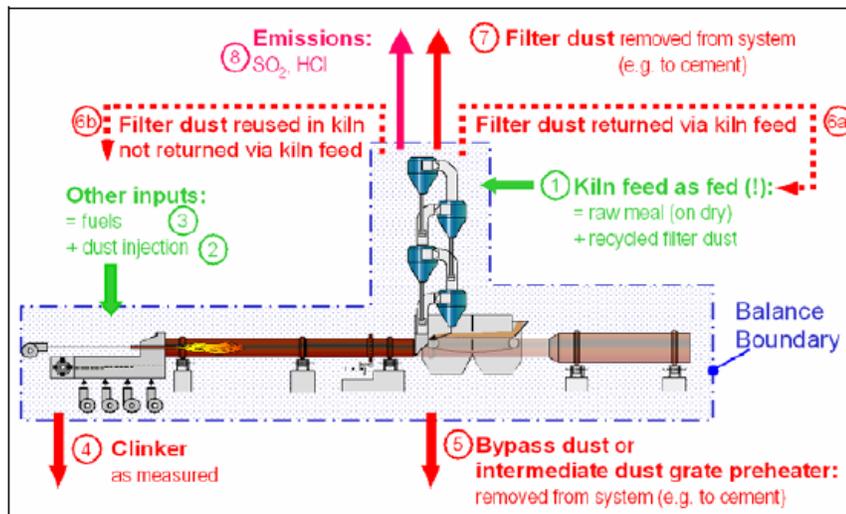


Fuente: PAULING, Dirk. *Guide for application of the alkali/sulfur/chlorine balance holcim group support Ltd.* p. 11.

3.5.7. Metodología experimental de la toma de muestras

La metodología que se utilizó fue del documento Guide for application of the alkali/sulfur/chlorine balance por dirk Pauling, según holcim group support Ltd.

Figura 7. Volumen de control del balance álcali-cloro/azufre



Fuente: PAULING, Dirk. *Guide for Application of the Alkali/Sulfur/Chlorine Balance Holcim Group Support Ltd.* p. 4

- Entradas
 - Alimentación del horno
 - Combustibles (petcoke, bunker, alterno)

- Salidas
 - Clinker

- Emisiones de gases durante la operación
- Polvo del filtro devuelto al sistema
- Ventajas
 - El muestreo es representativo y la recolección de muestras de la alimentación del horno y el polvo del filtro es comparativamente simple.
- Desventajas
 - Las concentraciones de álcalis, azufre y cloruro procedentes de las materias primas están influenciadas por el polvo del horno (mezclado con la harina cruda durante la molienda).
 - El cálculo de los insumos cloro en clinker o relevante requiere una atención especial y suposiciones con respecto a:
 - Muestreo del polvo del horno que sale del precalentador.
 - Cantidad de polvo que sale del precalentador, 7 % de la cantidad alimentada.
 - Valores de emisión de SO₂ y HCl.
- Duración del balance

La duración del balance depende de los objetivos:

- Evaluar los problemas temporales de revestimiento y bloqueo, la duración del equilibrio suele ser de 8 horas (no menos) con la toma de muestra por hora.
- Evaluar la situación general de un horno con respecto a la circulación de elementos, el balance también puede realizarse en periodos semanales, mensuales o anuales.
- Condiciones de operación
 - El horno debe estar en condiciones estables para evitar errores de equilibrio construcción de ciclos internos. El equilibrio no debe hacerse poco después de un inicio del horno (por ejemplo, menos de 1 día después de una parada del horno).
 - Durante condiciones no representativas, tales como largos períodos de funcionamiento directo con silos de almacenamiento de harina cruda casi vacío, el balance no debe hacerse.
- Toma de muestras

El mayor error al realizar un balance es la toma de muestras, por lo que las muestras deben ser representativas de todo el flujo de material.

- Las muestras deben tomarse en los puntos de transferencia y no desde la parte superior de un transportador.

- Cada punto de muestreo debe ser cuidadosamente evaluado y debatido críticamente junto con el departamento de control de calidad.
 - No se toma únicamente una fracción del grano de clinker, por lo tanto, los pedazos más grandes del clinker tales como los pedazos rojos que brillan intensamente no deben ser excluidos de la muestra.
 - No tomar muestras en partes superiores del transportador.
 - El muestreo representativo de combustible alternativo es muy difícil porque debe incluir todas las fracciones y puede requerir cantidades muy homogéneas.
- Precisión requerida para el balance

Los datos deben tener una precisión de dos cifras después del punto decimal en unidades de porcentaje masa-masa (%) con un margen de error menor al 10 %.

- Precisión esperada después del balance
 - El error de balance de masa debe ser <5 % (mejor <3 %).
 - El error de equilibrio de SO_3 , K_2O y Na_2O debe ser <20 %.
 - El error de equilibrio de Cl puede ser mucho mayor, porque la salida de Cl en el clinker no es constante y la pequeña cantidad de cloro en el clinker es difícil de analizar.

- Comparación de cloro de entrada con el cloro en harina caliente
 - Límites de entrada según el sistema del horno

Tabla XV. **Límites de entrada del sistema del horno**

Sistema del horno	Método de extracción de cloro	Concentración máxima de cloro relevante
Sistema convencional de horno	Circulación cerrada, no extracción significativa de cloro en polvo y emisiones	300 g Cl/ T clin

Fuente: PAULING, Dirk. *Guide for Application of the Alkali/Sulfur/Chlorine Balance Holcim Group Support Ltd.* p. 11.

- Metodología general
 - Se detuvo la operación del molino de bolas de harina cruda de la línea dos, por lo menos una hora antes de empezar el balance, siempre y cuando los silos de harina cruda estuvieran llenos.
 - Se mantuvo la carga de alimentación de harina cruda, combustible primario (petcoke), combustible secundario (bunker) y combustible alternativo constante durante las horas de muestreo.
 - Se tomó una muestra de cada uno de los puntos de muestreo cada hora durante un periodo de ocho horas.
 - Se controlaron los valores de carga de harina cruda, combustible primario, combustible secundario, combustible alternativo, polvo del filtro y clinker cada hora durante un periodo de 8 horas.

- Se identificaron las muestras con el código ya establecido para cada muestreo.
- Se reestableció el sistema de operación del horno de la línea dos para la fabricación de clinker luego de haber terminado el muestreo.
- Se entregaron las muestras de harina cruda, harina cruda caliente, clinker, polvo del filtro de clinker al laboratorio de control de calidad para la estipulación de la concentración de óxido de sodio, óxido de potasio, cloro y azufre.
- Se entregó las muestras de combustible primario, combustible secundario y combustible alternativo al Laboratorio de Proverde para la estipulación de la concentración de óxido de sodio, óxido de potasio, cloro y azufre.
- Los datos de emisiones de gases de ácido clorhídrico, óxido sulfuroso y el oxígeno de la recámara fueron tomados del analizador de gases en línea del programa ECSview que implementa Cementos Progreso S.A.

3.6. Recolección y ordenamiento de la información

El siguiente ordenamiento de la información fue utilizado para la recolección de la información en los dos tratamientos de la experimentación.

Tabla XVI. **Análisis de alimentación de harina cruda a 229,83 gramos de cloro por tonelada de clinker**

Núm.	Identificación muestra	K ₂ O (%)	Na ₂ O (%)	SO ₃ (%)	Cloro (%)
1	ALIM 462 12:00	0,50	0,2	0,36	0,00
2	ALIM 462 13:00	0,50	0,13	0,35	0,00
3	ALIM 462 14:00	0,51	0,19	0,37	0,00
4	ALIM 462 15:00	0,51	0,22	0,34	0,00
5	ALIM 462 16:00	0,51	0,19	0,36	0,00
6	ALIM 462 17:00	0,51	0,19	0,34	0,00
7	ALIM 462 18:00	0,50	0,21	0,37	0,00
8	ALIM 462 19:00	0,49	0,2	0,35	0,00

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVII. **Análisis de harina caliente a 229,83 gramos de cloro por tonelada de clinker**

Núm.	Identificación Muestra	K ₂ O (%)	Na ₂ O (%)	SO ₃ (%)	Cloro (%)
1	H.M.462 12:00	1,28	0,54	1,7	0,30
2	H.M.462 13:00	1,25	0,5	1,26	0,28
3	H.M.462 14:00	1,36	0,55	1,26	0,35
4	H.M.462 15:00	1,46	0,62	1,55	0,41
5	H.M.462 16:00	1,4	0,55	1,84	0,34
6	H.M.462 17:00	1,53	0,59	1,62	0,45
7	H.M.462 18:00	1,56	0,54	1,83	0,41
8	H.M.462 19:00	1,41	0,64	1,82	0,40

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVIII. **Análisis de muestras de clinker a 229,83 gramos de cloro por tonelada de clinker**

Núm.	Identificación muestra	K ₂ O (%)	Na ₂ O (%)	SO ₃ (%)	Cloro (%)
1	CLIN-HR2-462 12:00	0,60	0,28	1,23	0,00
2	CLIN-HR2-462 13:00	0,73	0,28	1,59	0,00
3	CLIN-HR2-462 14:00	0,70	0,28	1,41	0,00
4	CLIN-HR2-462 15:00	0,65	0,28	1,28	0,00

Continuación de la tabla XVIII.

5	CLIN-HR2-462 16:00	0,65	0,27	1,29	0,00
6	CLIN-HR2-462 17:00	0,68	0,28	1,35	0,00
7	CLIN-HR2-462 18:00	0,69	0,30	1,40	0,00
8	CLIN-HR2-462 19:00	0,65	0,29	1,30	0,00

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIX. **Análisis de muestras del polvo del filtro a 229,83 gramos de cloro por tonelada de clinker**

Núm.	Identificación muestra	K ₂ O (%)	Na ₂ O (%)	SO ₃ (%)	Cloro (%)
1	FILTRO.462 12:00	0,71	0,19	0,49	0,09
2	FILTRO.462 13:00	0,70	0,19	0,47	0,07
3	FILTRO.462 14:00	0,71	0,20	0,46	0,05
4	FILTRO.462 15:00	0,70	0,21	0,45	0,09
5	FILTRO.462 16:00	0,71	0,23	0,45	0,04
6	FILTRO.462 17:00	0,71	0,21	0,48	0,04
7	FILTRO.462 18:00	0,72	0,20	0,48	0,05
8	FILTRO.462 19:00	0,73	0,23	0,45	0,08

Fuente: elaboración propia.

Tabla XX. **Análisis de muestras del combustible petcoke a 229,83 gramos de cloro por tonelada de clinker**

Núm.	Identificación muestra	Azufre (%S)	SO ₃ (%)	Cloro (%)	Poder Calorífico (kJ/kg)
1	COKE-L43-12:00	5,34	13,30	0,11	33 780,00
2	COKE-L43-13:00	5,38	13,40	0,14	34 073,00
3	COKE-L43-14:00	5,36	13,35	0,14	33 722,00
4	COKE-L43-15:00	5,35	13,32	0,11	32 743,00
5	COKE-L43-16:00	5,38	13,40	0,11	32 954,00
6	COKE-L43-17:00	5,35	13,32	0,11	32 278,00
7	COKE-L43-18:00	5,39	13,42	0,11	33 420,00
8	COKE-L43-19:00	5,39	13,42	0,14	32 897,00

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXI. Análisis de muestras del combustible bunker a 229,83 gramos de cloro por tonelada de clinker

Núm.	Identificación muestra	Azufre (%S)	SO ₃ (%)	Cloro (%Cl)	Poder calorífico (kJ/kg)
1	BUNK-462-12:00	2,36	5,88	0,05	42 471,00
2	BUNK-462-13:00	2,34	5,83	0,05	42 396,00
3	BUNK-462-14:00	2,25	5,60	0,07	42 123,00
4	BUNK-462-15:00	2,28	5,68	0,04	42 164,00
5	BUNK-462-16:00	2,32	5,78	0,05	42 568,00
6	BUNK-462--17:00	2,36	5,88	0,07	42 128,00
7	BUNK-462-18:00	2,36	5,88	0,05	42 423,00
8	BUNK-462-19:00	2,34	5,83	0,05	42 553,00

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXII. Análisis de muestras del combustible alternativo a 229,83 gramos de cloro por tonelada de clinker

Núm.	Identificación muestra	Azufre (%S)	SO ₃ (%)	Cloro (%Cl)	Poder calorífico (kJ/kg)
1	AFR-462--12:00	0,47	1,2	1,63	16 543,00
2	AFR-462--13:00	0,73	1,8	1,51	18 742,00
3	AFR-462--14:00	0,77	1,9	1,46	18 855,00
4	AFR-462--15:00	0,89	2,2	2,71	19 851,00
5	AFR-462--16:00	0,14	0,4	3,47	17 566,00
6	AFR-462--17:00	0,45	1,1	2,31	20 497,00
7	AFR-462--18:00	0,59	1,5	2,1	20 740,00
8	AFR-462--19:00	0,49	1,2	1,4	21 167,00

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIII. **Monitoreo de emisiones de gases a 229,83 gramos de cloro por tonelada de clinker**

Núm.	Identificación muestra	Emisiones (O%):	SO ₂ (mg/m3)	HCl (mg/m3):
1	12:00:00	7,8	0	15,21
2	13:00:00	8	0	15,97
3	14:00:00	8	0	15,80
4	15:00:00	8,1	0	16,79
5	16:00:00	8,9	0	16,23
6	17:00:00	8,9	0	16,23
7	18:00:00	8,6	0	16,77
8	19:00:00	9,2	0	16,77

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIV. **Monitoreo flujos máxicos a 229,83 gramos de cloro por tonelada de clinker**

Núm.	Identificación muestra	Harina cruda (T/h):	Clinker producido (T/h):	Solidos (T/h)	Polvo del filtro (T/h)	Petcoke (T/h):	Bunker (T/h)
1	12:00:00	126,6	77,50	0,85	8,86	7,59	0,83
2	13:00:00	127,5	77,38	0,85	8,93	7,59	0,86
3	14:00:00	127,5	77,36	0,85	8,93	7,63	0,83
4	15:00:00	128,4	77,47	0,84	8,99	7,63	0,83
5	16:00:00	128,2	77,56	0,89	8,97	7,69	0,88
6	17:00:00	128,4	77,41	0,86	8,99	7,63	0,88
7	18:00:00	128,4	77,50	0,85	8,99	7,59	0,92
8	19:00:00	128,4	77,42	0,85	8,99	7,59	0,84

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXV. **Análisis de alimentación de harina cruda a 265,73 gramos de cloro por tonelada de clinker**

Núm.	Identificación muestra	K ₂ O (%)	Na ₂ O (%)	SO ₃ (%)	Cloro (%)
1	ALIM 462 8:00	0,47	0,20	0,36	0,00
2	ALIM 462 9:00	0,47	0,19	0,37	0,00
3	ALIM 462 10:00	0,47	0,19	0,40	0,00
4	ALIM 462 11:00	0,47	0,20	0,35	0,00
5	ALIM 462 12:00	0,47	0,20	0,35	0,00
6	ALIM 462 13:00	0,46	0,20	0,37	0,00
7	ALIM 462 14:00	0,46	0,19	0,36	0,00
8	ALIM 462 15:00	0,46	0,20	0,38	0,00

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVI. **Análisis de harina caliente a 265,73 gramos de cloro por tonelada de clinker**

Núm.	Identificación muestra	K ₂ O (%)	Na ₂ O (%)	SO ₃ (%)	Cloro (%)
1	H.M.462 8:00	1,01	0,20	2,01	0,49
2	H.M.462 9:00	0,94	0,20	1,93	0,43
3	H.M.462 10:00	0,97	0,20	1,74	0,41
4	H.M.462 11:00	1,06	0,20	1,84	0,46
5	H.M.462 12:00	0,89	0,20	1,39	0,34
6	H.M.462 13:00	0,97	0,20	1,99	0,51
7	H.M.462 14:00	1,08	0,20	2,16	0,54
8	H.M.462 15:00	0,91	0,20	2,08	0,59

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVII. **Análisis de muestras de clinker a 265,73 gramos de cloro por tonelada de clinker**

Núm.	Identificación muestra	K ₂ O (%)	Na ₂ O (%)	SO ₃ (%)	Cloro (%)
1	CLIN-HR2-462 08:00	0,62	0,34	1,37	0,00
2	CLIN-HR2-462 09:00	0,64	0,37	1,36	0,00
3	CLIN-HR2-462 10:00	0,68	0,34	1,45	0,00
4	CLIN-HR2-462 11:00	0,67	0,37	1,51	0,00
5	CLIN-HR2-462 12:00	0,74	0,39	1,78	0,00

Continuación de la tabla XXVII.

6	CLIN-HR2-462 13:00	0,67	0,37	1,45	0,00
7	CLIN-HR2-462 14:00	0,67	0,36	1,47	0,00
8	CLIN-HR2-462 15:00	0,73	0,38	1,55	0,00

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVIII. **Análisis de muestras del polvo del filtro a 265,73 gramos de cloro por tonelada de clinker**

Núm.	Identificación Muestra	K ₂ O (%)	Na ₂ O (%)	SO ₃ (%)	Cloro (%)
1	FILTRO.462 8:00	0,65	0,2	0,42	0,10
2	FILTRO.462 9:00	0,66	0,2	0,43	0,11
3	FILTRO.462 10:00	0,61	0,2	0,44	0,10
4	FILTRO.462 11:00	0,65	0,2	0,42	0,10
5	FILTRO.462 12:00	0,65	0,19	0,44	0,11
6	FILTRO.462 13:00	0,63	0,2	0,45	0,11
7	FILTRO.462 14:00	0,64	0,2	0,44	0,11
8	FILTRO.462 15:00	0,64	0,2	0,44	0,10

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIX. **Análisis de muestras del combustible petcoke a 265,73 gramos de cloro por tonelada de clinker**

Núm.	Identificación muestra	Azufre (%S)	SO ₃ (%)	Cloro (%)	Poder calorífico (kJ/kg)
1	COKE-L43-8:00	5,34	13,30	0,11	33 780,0
2	COKE-L43-9:00	5,38	13,40	0,14	34 073,0
3	COKE-L43-10:00	5,36	13,35	0,14	33 722,0
4	COKE-L43-11:00	5,35	13,32	0,11	32 743,0
5	COKE-L43-12:00	5,38	13,40	0,11	32 954,0
6	COKE-L43-13:00	5,35	13,32	0,11	32 278,0
7	COKE-L43-14:00	5,39	13,42	0,11	33 420,0
8	COKE-L43-15:00	5,39	13,42	0,14	32 897,0

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXX. **Análisis de muestras del combustible bunker a 265,73
gramos de cloro por tonelada de clinker**

Núm.	Identificación muestra	Azufre (%S)	SO ₃ (%)	Cloro (%)	Poder calorífico (kJ/kg)
1	BUNK-462--08:00	2,1428	5,34	0,07	42 299,0
2	BUNK-462--09:00	2,0907	5,21	0,06	42 634,0
3	BUNK-462--10:00	2,1144	5,26	0,04	42 875,0
4	BUNK-462--11:00	2,1317	5,31	0,05	42 763,0
5	BUNK-462--12:00	2,1405	5,33	0,04	42 753,0
6	BUNK-462--13:00	2,1103	5,25	0,05	42 791,0
7	BUNK-462--14:00	2,1151	5,27	0,02	42 711,0
8	BUNK-462--15:00	2,1186	5,28	0,04	42 686,0

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXI. **Análisis de muestras del combustible alternativo a 265,73
gramos de cloro por tonelada de clinker**

Núm.	Identificación muestra	Azufre (%S)	SO ₃ (%)	Cloro (%)	Poder calorífico (kJ/kg)
1	AFR-462--08:00	0,16784	0,42	1,95	17 464,00
2	AFR-462--09:00	0,30801	0,77	1,46	19 368,00
3	AFR-462--10:00	0,17066	0,42	1,68	12 023,00
4	AFR-462--11:00	0,19341	0,48	2,07	17 832,00
5	AFR-462--12:00	0,1882	0,47	0,99	19 595,00
6	AFR-462--13:00	0,27215	0,68	4,09	15 066,00
7	AFR-462--14:00	0,22146	0,55	1,78	17 726,00
8	AFR-462--15:00	0,15664	0,39	1,53	17 135,00

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXII. **Monitoreo emisiones de gases a 265,73 gramos de cloro por tonelada de clinker**

Núm.	Identificación muestra	Emisiones (O ₂ %):	SO ₂ (mg/m ³):	HCl (mg/m ³):
1	8:00:00	7,40	0,00	13,62
2	9:00:00	6,90	0,00	20,03
3	10:00:00	8,10	0,00	20,65
4	11:00:00	8,20	0,68	22,17
5	12:00:00	8,30	0,33	18,80
6	13:00:00	8,20	0,99	18,06
7	14:00:00	8,70	0,03	16,78
8	15:00:00	8,70	0,08	17,35

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXIII. **Monitoreo flujos máxicos a 265,73 gramos de cloro por tonelada de clinker**

Núm.	Identificación muestra	Harina cruda (T/h):	Clinker producido (T/h):	Sólidos (T/h)	Polvo del filtro (T/h)	Petcoke (T/h):	Bunker (T/h)
1	8:00:00	124,70	76,38	1,05	8,73	7,69	0,94
2	9:00:00	126,60	76,56	1,04	8,86	7,69	0,92
3	10:00:00	126,60	76,30	1,05	8,86	7,69	0,86
4	11:00:00	127,50	76,55	1,05	8,93	7,69	0,88
5	12:00:00	127,50	76,42	1,04	8,93	7,69	0,83
6	13:00:00	127,50	76,62	1,04	8,93	8,00	0,77
7	14:00:00	127,50	76,57	1,05	8,93	7,97	0,58
8	15:00:00	126,60	76,55	1,05	8,86	8,06	0,48

Fuente: elaboración propia.

3.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

Se utilizó la misma tabulación y el ordenamiento para los dos tratamientos de la experimentación que consisten en dos diferentes concentraciones de cloro en el combustible alternativo alimentado al horno de la línea dos. En esta

sección se aplicará el análisis estadístico de la media muestral y la desviación estándar.

Tabla XXXIV. **Concentraciones de entrada de óxido de potasio (K₂O), óxido de sodio (Na₂O), óxido sulfúrico (SO₃) y cloro a 229,83 gramos de cloro por tonelada de clinker**

Fecha	Hora	K ₂ O (%)	Na ₂ O (%)	SO ₃ (%)	Cl (%)
11/12/2017	12:00	0,82	0,33	1,97	0.029
11/12/2017	13:00	0,82	0,21	1,98	0.031
11/12/2017	14:00	0,84	0,31	2,01	0.031
11/12/2017	15:00	0,85	0,37	1,96	0.041
11/12/2017	16:00	0,84	0,31	1,99	0.051
11/12/2017	17:00	0,85	0,32	1,96	0.037
11/12/2017	18:00	0,83	0,35	2,01	0.034
11/12/2017	19:00	0,81	0,33	1,97	0.030
Promedio		0,83	0,32	1,98	0,04
STD		0,01	0,04	0,02	0,01

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXV. **Concentraciones en clinker de óxido de potasio (K₂O), óxido de sodio (Na₂O), óxido sulfúrico (SO₃) y cloro a 229,83 gramos de cloro por tonelada de clinker**

Fecha	Hora	K ₂ O (%)	Na ₂ O (%)	SO ₃ (%)	Cl (%)	A/S
11/12/2017	12:00	0,60	0,28	1,23	0,000	0.71
11/12/2017	13:00	0,73	0,28	1,59	0,000	0.62
11/12/2017	14:00	0,70	0,28	1,41	0,000	0.68
11/12/2017	15:00	0,65	0,28	1,28	0,000	0.71
11/12/2017	16:00	0,65	0,27	1,29	0,000	0.70
11/12/2017	17:00	0,68	0,28	1,35	0,000	0.70
11/12/2017	18:00	0,69	0,30	1,40	0,000	0.70
11/12/2017	19:00	0,65	0,29	1,30	0,000	0.71
Promedio		0,67	0,28	1,36	0,00	0,69
STD		0,04	0,01	0,11	0,00	0,03

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXVI. **Concentraciones de salida de óxido de potasio (K₂O), óxido de sodio (Na₂O), óxido sulfúrico (SO₃) y cloro a 229,83 gramos de cloro por tonelada de clinker**

Fecha	Hora	K ₂ O (%)	Na ₂ O (%)	SO ₃ (%)	Cl (%)
11/12/2017	12:00	0,68	0,30	1,29	0.01
11/12/2017	13:00	0,81	0,30	1,64	0.01
11/12/2017	14:00	0,78	0,30	1,46	0.01
11/12/2017	15:00	0,73	0,30	1,33	0.01
11/12/2017	16:00	0,73	0,30	1,34	0.01
11/12/2017	17:00	0,76	0,30	1,41	0.01
11/12/2017	18:00	0,77	0,32	1,46	0.01
11/12/2017	19:00	0,73	0,32	1,35	0.01
Promedio		0,75	0,31	1,41	0,01
STD		0,04	0,01	0,11	0,00

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXVII. **Cloro en harina caliente en clinker en gramos de cloro por tonelada de clinker a 229,83 gramos de cloro por tonelada de clinker**

Fecha	Hora	Cl harina caliente gCl/ Tcliker	Cloro en clinker gCl/ Tcliker
11/12/2017	12:00	59,64	158,61
11/12/2017	13:00	56,42	193,18
11/12/2017	14:00	69,08	223,54
11/12/2017	15:00	81,96	271,55
11/12/2017	16:00	68,84	436,61
11/12/2017	17:00	90,72	290,84
11/12/2017	18:00	81,42	248,67
11/12/2017	19:00	79,88	164,71
Promedio		73,50	248,46
STD		11,93	89,84

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXVIII. **Concentraciones de óxido sulfúrico (SO₃) y cloro en harina caliente a 229,83 gramos de cloro por tonelada de clinker**

Fecha	Hora	Cl (%)	SO ₃ (%)
11/12/2017	12:00	0,30	1,70
11/12/2017	13:00	0,28	1,26
11/12/2017	14:00	0,35	1,26
11/12/2017	15:00	0,41	1,55
11/12/2017	16:00	0,34	1,84
11/12/2017	17:00	0,45	1,62
11/12/2017	18:00	0,41	1,83
11/12/2017	19:00	0,40	1,82
Promedio		0,37	1,61
STD		0,07	0,24

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXIX. **Concentraciones de entrada de óxido de potasio (K₂O), óxido de sodio (Na₂O), óxido sulfúrico (SO₃) y cloro a 265,73 gramos de cloro por tonelada de clinker**

Fecha	Hora	K ₂ O (%)	Na ₂ O (%)	SO ₃ (%)	Cl (%)
02/02/2018	8:00:00	0,77	0,33	1,99	0,039
02/02/2018	9:00:00	0,78	0,31	2,04	0,035
02/02/2018	10:00:00	0,78	0,32	2,08	0,038
02/02/2018	11:00:00	0,78	0,33	1,99	0,040
02/02/2018	12:00:00	0,78	0,33	2,00	0,025
02/02/2018	13:00:00	0,77	0,33	2,07	0,068
02/02/2018	14:00:00	0,77	0,32	2,04	0,036
02/02/2018	15:00:00	0,76	0,33	2,09	0,036
Promedio		0,77	0,32	2,03	0,040
STD		0,01	0,01	0,04	0,013

Fuente: elaboración propia.

Tabla XL. **Concentraciones en clinker de óxido de potasio (K₂O), óxido de sodio (Na₂O), óxido sulfúrico (SO₃) y cloro a 265,73 gramos de cloro por tonelada de clinker**

Fecha	Hora	K ₂ O (%)	Na ₂ O (%)	SO ₃ (%)	Cl (%)	A/S
02/02/2018	8:00	0,62	0,34	1,37	0,00	0,71
02/02/2018	9:00	0,64	0,37	1,36	0,00	0,75
02/02/2018	10:00	0,68	0,34	1,45	0,00	0,70
02/02/2018	11:00	0,67	0,37	1,51	0,00	0,69
02/02/2018	12:00	0,74	0,39	1,78	0,00	0,64
02/02/2018	13:00	0,67	0,37	1,45	0,00	0,72
02/02/2018	14:00	0,67	0,36	1,47	0,00	0,70
02/02/2018	15:00	0,73	0,38	1,55	0,00	0,72
Promedio		0,67	0,36	1,48	0,00	0,70
STD		0,04	0,02	0,14	0,00	0,03

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLI. **Concentraciones de salida de óxido de potasio (K₂O), óxido de sodio (Na₂O), óxido sulfúrico (SO₃) y cloro a 265,73 gramos de cloro por tonelada de clinker**

Fecha	Hora	K ₂ O (%)	Na ₂ O (%)	SO ₃ (%)	Cl (%)	A/S
02/02/2018	8:00	0,69	0,36	1,42	0,01	0,74
02/02/2018	9:00	0,72	0,39	1,41	0,01	0,78
02/02/2018	10:00	0,75	0,36	1,50	0,01	0,73
02/02/2018	11:00	0,75	0,39	1,56	0,01	0,72
02/02/2018	12:00	0,82	0,41	1,83	0,01	0,66
02/02/2018	13:00	0,74	0,39	1,50	0,01	0,75
02/02/2018	14:00	0,74	0,38	1,52	0,01	0,73
02/02/2018	15:00	0,80	0,40	1,60	0,01	0,74
PROMEDIO		0,74	0,39	1,53	0,01	0,73
STD		0,04	0,02	0,14	0,00	0,04

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLII. **Cloro en harina caliente en clinker en gramos de cloro por tonelada de clinker a 265,73 gramos de cloro por tonelada de clinker**

Fecha	Hora	Cl Harina caliente (gCl/Tcliker)	Cloro en clinker (gCl/Tcliker)
02/02/2018	8:00	98,48	245,90
02/02/2018	9:00	85,32	183,96
02/02/2018	10:00	81,68	218,45
02/02/2018	11:00	91,72	235,83
02/02/2018	12:00	67,04	82,14
02/02/2018	13:00	101,88	508,94
02/02/2018	14:00	107,46	197,55
02/02/2018	15:00	118,54	210,59
Promedio		90,51	238,97
STD		13,77	130,83

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLIII. **Concentraciones de óxido sulfúrico (SO₃) y cloro en harina caliente a 265,73 gramos de cloro por tonelada de clinker**

Fecha	Hora	Cl (%)	SO ₃ (%)
02/02/2018	8:00	0,49	2,01
02/02/2018	9:00	0,43	1,93
02/02/2018	10:00	0,41	1,74
02/02/2018	11:00	0,46	1,84
02/02/2018	12:00	0,34	1,39
02/02/2018	13:00	0,51	1,99
02/02/2018	14:00	0,54	2,16
02/02/2018	15:00	0,59	2,08
Promedio		0,45	1,87
STD		0,07	0,25

Fuente: elaboración propia.

3.8. Análisis estadístico

El diseño experimental estará constituido por dos tratamientos que consiste en dos concentraciones diferentes de cloro en el combustible alternativo que estará formado por una mezcla de sólidos triturados, se

realizarán ocho repeticiones de las ocho muestras que constituirán la parte experimental de la investigación. Por lo que se obtendrán 128 unidades experimentales.

3.8.1. Media muestral o promedio

Determina el valor intermedio de una serie de datos relacionados.

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n}$$

Donde:

- \bar{x} : media muestral
- x_i : dato relacionado
- n : cantidad de datos relacionados

3.8.2. Desviación estándar

Es la medida de dispersión de una serie de datos con respecto a su media muestral.

$$STD = \sqrt{\frac{\sum(\bar{x} - x_i)^2}{n - 1}}$$

Donde:

- STD : desviación estándar de la media

3.8.3. Análisis de varianza

La comprobación de la hipótesis nula y alternativa se realiza utilizando el análisis de varianza de un factor en el programa de Microsoft Excel; utiliza una significancia del 5 %.

3.9. Plan de análisis de los resultados

3.9.1. Métodos y modelos de los datos según tipo de variables

3.9.1.1. Método para la realización de un balance álcali-cloro/azufre

- La operación del horno con las variables de entrada como carga de alimentación de la harina cruda, combustible primario y combustible secundario.
- Mantener constante la velocidad del Horno 462.
- Detener la operación del molino de harina cruda para evitar la absorción de gases.
- Muestrear los punto de ingreso y egreso de:
 - Harina cruda
 - Harina caliente
 - Combustible primario
 - Combustible secundario
 - Combustible alterno

- Polvo del filtro
- Clinker

- Realizar el muestreo por un periodo de tiempo de 8 horas.

- Tomar una muestra de cada punto por una hora.

- Reestablecer el sistema de operación como encender el molino de harina cruda luego de haber terminado el muestreo

3.9.2. Programas para el análisis de datos

Se utilizará el programa ECSView para obtener los datos del analizador ambiental de la chimenea de gases con la finalidad de obtener las emisiones de gases durante la realización de muestreos.

Para la realización del trabajo de graduación se utilizó Microsoft Word; para el ordenamiento y administración de la información se utilizó Microsoft Excel; para la visualización de los flujos másico de entrada en el sistema se utilizó el programa utilizada por control central y el equipo de optimización Cementos Progreso ECSview.

3.9.3. Resultados del análisis estadísticos

La estadística inferencial es una herramienta esencial en la investigación científica, que permite la toma de decisiones a partir de los resultados experimentales. Por lo tanto, se realizó el análisis de varianza para un factor, conocido como ANOVA, el cual contrasta si la diferencia entre las medias muestrales es significativa.

Tabla XLIV. **Análisis de varianza para un factor conocido como ANOVA**

Suma de cuadrados	Grados de libertad	Varianza	Cálculo
$SS_T = \sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{N}$	N-1		$F = \frac{S_E^2}{S_D^2}$
$SS_E = \left[\frac{(\sum x_1)^2}{n_1} + \frac{(\sum x_2)^2}{n_2} + \frac{(\sum x_k)^2}{n_k} \right] - \frac{(\sum x)^2}{N}$	k-1	$S_E^2 = \frac{SS_E}{k-1}$	
$SS_D = SS_T - SS_E$	N-k	$S_D^2 = \frac{SS_D}{N-k}$	

Fuente: *Métodos de análisis de datos en ecología*. <https://www.uco.es/servicios/informatica/windows/filemgr/download/ecolog/Metodos%20analisis%20datos.pdf>. Consulta: 09 de marzo de 2018.

Donde:

- SST = suma de cuadrados total
- SSE = suma de cuadrados entre grupos
- SSD = suma de cuadrados dentro de grupos
- sE = varianza entre grupos
- sD = varianza dentro de grupos
- N = número total de datos
- k = número de grupos
- x = cada uno de los datos de cada grupo
- n1, n2, ..., nk = número de datos en cada grupo
- F = distribución de Fisher

La comprobación de hipótesis se realiza comparando el valor de F calculada con el valor de F crítico, a través de una significancia de 5 %, lo que representa un 95 % de confianza. Por lo tanto, si el valor de la F calculada es mayor que F crítico existen diferencias entre los grupos y, por lo tanto, se acepta la hipótesis alternativa y se rechaza la hipótesis nula. Por consiguiente,

a continuación, se presentarán los resultados de los análisis de comprobación de hipótesis.

Tabla XLV. Experimentación de un factor para la concentración total de cloro que ingresa al sistema

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
229,83	8	0,284	0,036	5,815E-05
265,73	8	0,316	0,039	1,509E-04

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLVI. Análisis de varianza de un factor para la concentración total de cloro que ingresa al sistema

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico para F
Entre grupos	6,22E-05	1	6,22E-05	0,595	4,600
Dentro de los grupos	1,46E-03	14	1,05E-04		
Total	1,53E-03	15			

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLVII. Experimentación de un factor para la concentración total de cloro que egresa del sistema.

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
229,83	8	0,0853	0,0107	6,316E-06
265,73	8	0,1272	0,0159	8,445E-07

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLVIII. **Análisis de Varianza de un factor para la concentración total de cloro egresa del sistema**

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico para F
Entre grupos	1,10E-04	1	1,10E-04	30,757	4,600
Dentro de los grupos	5,01E-05	14	3,58E-06		
Total	1,60E-04	15			

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLIX. **Experimentación de un factor para la relación álcali-cloro/azufre en clinker**

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
229.83	8	5,525	0,691	9,95E-04
265.73	8	5,632	0,704	1,06E-03

Fuente: elaboración propia.

Tabla L. **Análisis de varianza de un factor para la relación álcali-cloro/azufre en clinker**

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico para F
Entre grupos	7,28E-04	1	7,28E-04	0,707	4,600
Dentro de los grupos	1,44E-02	14	1,03E-03		
Total	1,51E-02	15			

Fuente: elaboración propia.

4. RESULTADOS

A continuación, se detallan las concentraciones de los flujos másicos de las entradas y salidas del sistema del horno de la línea 2 de la industria cementera donde se realiza la reacción de clinkerización.

Tabla LI. **Concentraciones de entrada y salida de óxido de potasio (K₂O), óxido de sodio (Na₂O), óxido sulfúrico (SO₃) y cloro a 229,83 gramos de cloro por tonelada de clinker**

Corrida		Descripción	Na ₂ O (%)	K ₂ O (%)	SO ₃ (%)	Cl (%)
1	Entrada	Alimentación (harina cruda)	0,32	0,83	0,59	0,00
		Petcoke	0,00	0,00	1,31	0,012
		Bunker	0,00	0,00	0,06	0,001
		Combustible alternativo	0,00	0,00	0,02	0,023
		Total de Ingreso	0,32	0,83	1,98	0,036
	Salida	Clinker	0,28	0,67	1,36	0,00
		Polvo del filtro	0,02	0,08	0,05	0,01
		Emisiones de gases	0	0	0,00	0,0031
		Total de egreso	0,31	0,75	1,41	0,0107

Fuente: elaboración propia.

Tabla LII. **Concentraciones de entrada y salida de óxido de potasio (K₂O), óxido de sodio (Na₂O), óxido sulfúrico (SO₃) y cloro a 265,73 gramos de cloro por tonelada de clinker**

Corrida		Descripción	Na ₂ O (%)	K ₂ O (%)	SO ₃ (%)	Cl (%)
2	Entrada	Alimentación (harina cruda)	0,33	0,77	0,61	0,00
		Petcoke	0,00	0,00	1,36	0,012
		Bunker	0,00	0,00	0,05	0,0005
		Combustible alternativo	0,00	0,00	0,01	0,027
		Total de ingreso	0,33	0,77	2,04	0,0394

Continuación de la tabla LII.

Salida	Clinker	0,37	0,68	1,49	0,00
	Polvo del filtro	0,02	0,07	0,05	0,01
	Emisiones de gases	0,00	0,00	0,00	0,0035
	Total de egreso	0,39	0,75	1,54	0,0159

Fuente: elaboración propia.

Tabla LIII. **Relación álcali-cloro/azufre en clinker a 229,83 y 265,73 gramos de cloro por tonelada de clinker**

Cantidad de gCl/tclin ingreso	Descripción	Na ₂ O (%)	K ₂ O (%)	SO ₃ (%)	Cl (%)	A/S
229.83	Clinker	0,28	0,67	1,36	0,00	0,69
265.73	Clinker	0,37	0,68	1,49	0,00	0,70

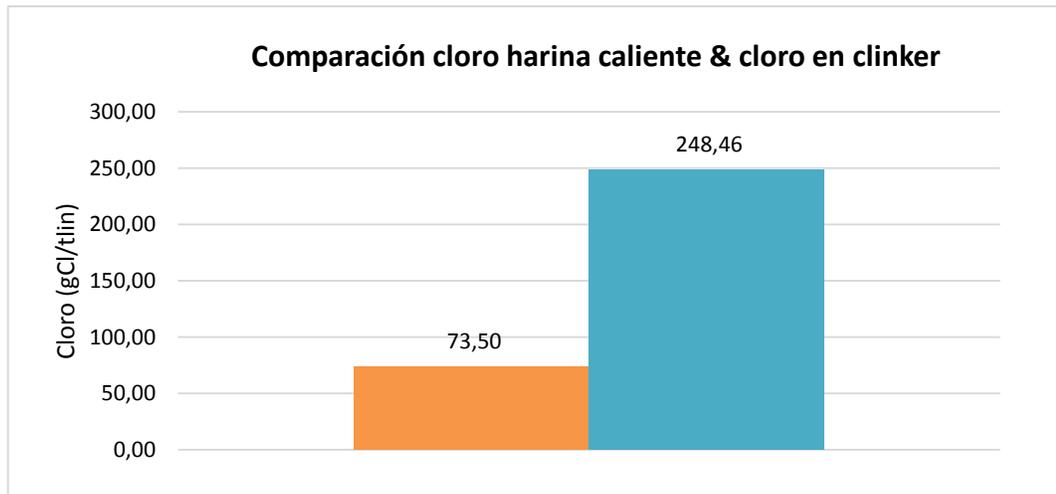
Fuente: elaboración propia.

Tabla LIV. **Comparación de cloro en harina caliente y en clinker a 229,83 y 265,73 gramos de cloro por tonelada de clinker**

Cantidad de gCl/tclin ingreso	Cl H. M. (gCl/tclin)	Cl clinker (gCl/tclin)
229,83	73,50	248,46
265,73	94,02	235,42

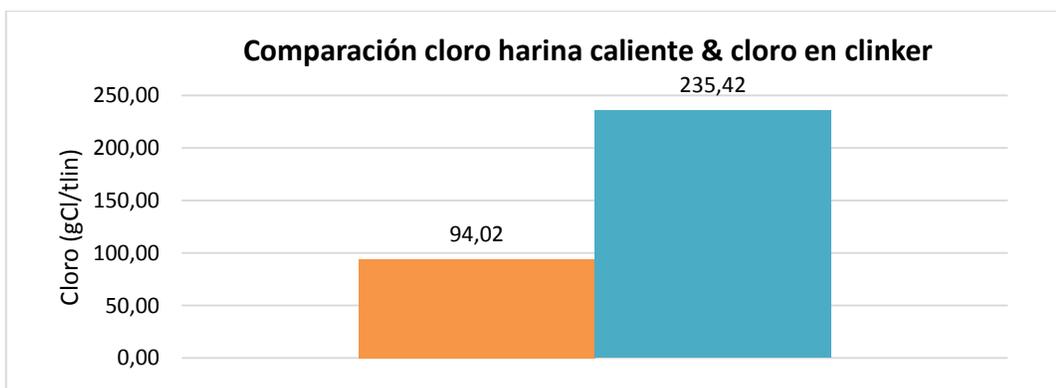
Fuente: elaboración propia.

Figura 8. **Comparación de cloro en harina caliente y en clinker a 229,83 gramos de cloro por tonelada de clinker**



Fuente: elaboración propia.

Figura 9. **Comparación de cloro en harina caliente y en clinker a 265,73 gramos de cloro por tonelada de clinker**



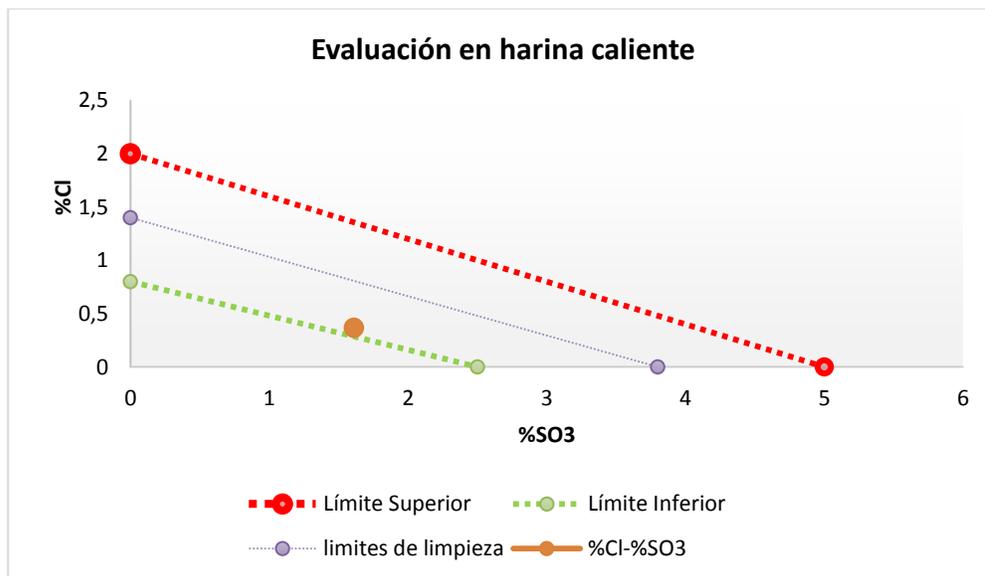
Fuente: elaboración propia.

Tabla LV. **Evaluación de óxido sulfúrico (SO₃) y cloro en harina caliente a 229,83 y 265,73 gramos de cloro por tonelada de clinker**

Cantidad de gCl/tclin ingreso	Cl (%) H.M	SO ₃ H.M. (%)
229,83	0,37	1,70
265,73	0,45	1,87

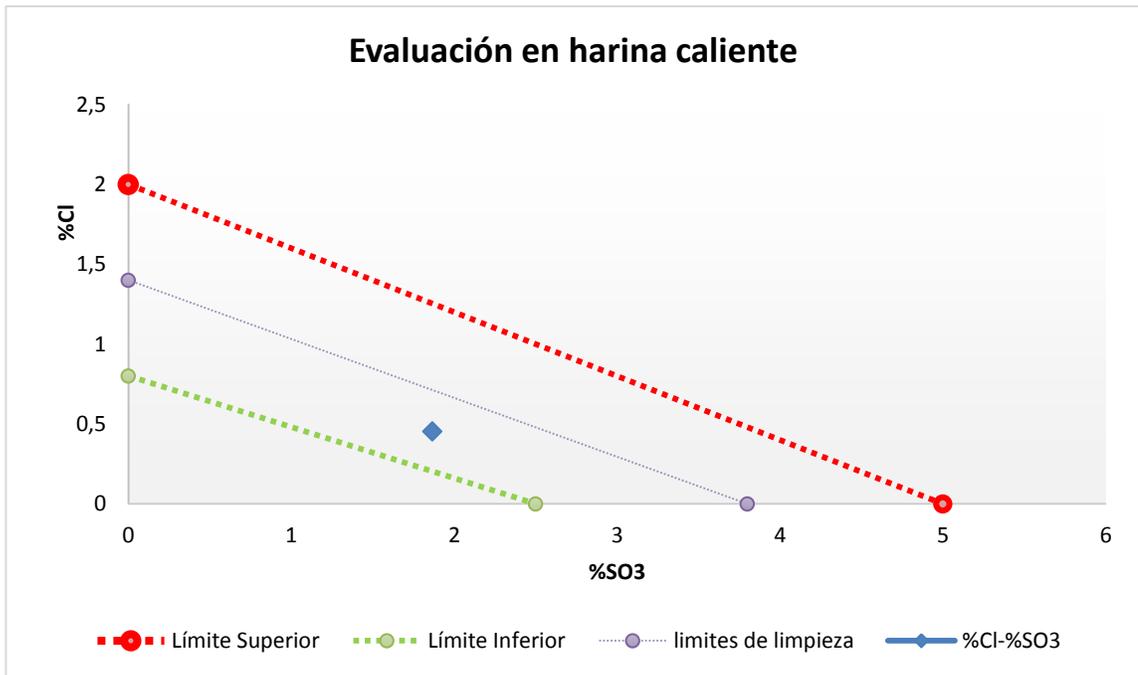
Fuente: elaboración propia.

Figura 10. **Evaluación de óxido sulfúrico (SO₃) y cloro en harina caliente a 229,83 gramos de cloro por tonelada de clinker**



Fuente: elaboración propia.

Figura 11. Evaluación de óxido Sulfúrico (SO_3) y cloro en harina caliente a 265.73 gramos de cloro por tonelada de clinker



Fuente: elaboración propia.

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

En el presente estudio de investigación tuvo como objetivo la evaluación del impacto de cloro proveniente de la alimentación de combustible alterno en el Horno de la línea dos para la fabricación de clinker en una industria cementera a través de la metodología de la realización del balance álcali-cloro/azufre.

La investigación se realizó en el horno 462 para la fabricación de clinker en planta San Miguel de la industria Cementos Progreso S. A. El impacto de cloro en el proceso de clinkerización en Cementos Progreso ha sido de gran impacto en costos de producción y mantenimiento; sin embargo, el desarrollo sostenible, el compromiso con el medio ambiente, las altas temperaturas de los hornos y las emisiones de gases seguras ha permitido el coprocesar combustibles alternativos que son derivados del preprocesamiento de desechos industriales como plásticos no reciclables, desechos agrícolas, empaques alimenticios que son fuente de cloro en el horno.

Por lo tanto, la evaluación del impacto de cloro se realizó mediante la comparación de los resultados del balance álcali-cloro/azufre de dos estados que fueron determinados por el suministro de combustible alterno a una concentración de cloro de 2 %, con tasas de alimentación diferente de 0,85 y 1,05 toneladas por hora de combustible alterno, a un rendimiento del horno aproximado del 91 %, lo cual constituyó la primera corrida y la segunda corrida con 229,83 y 265,73 gramos de cloro de combustible alterno por tonelada de Clinker, respectivamente.

En la tabla LII, se observó que la concentración de entrada y salida de óxido de potasio (K_2O), óxido de sodio (Na_2O), óxido sulfúrico (SO_3) y cloro en el sistema del horno no fueron cantidades iguales; por lo tanto, el balance de masa mostró que existió una acumulación de material en el sistema del horno durante la prueba experimental. Se analizó que la acumulación de material en el sistema durante el balance álcali-cloro/azufre para los álcalis fue un porcentaje menor del 10 %, como para el óxido de azufre menos del 29 %, mientras que el mayor descuadre de material se presentó por parte del cloro en el sistema con una reserva de materia mayor al 50 %.

Por lo que, se analizó que el ingreso total de cloro en el horno fue aproximadamente un 65 % por parte del combustible alterno, pero se egresó únicamente del sistema un 30 % de la cantidad total de cloro que se suministró. Por lo tanto, el fenómeno de circulación de cloro dentro del horno se llevó a cabo, debido a que el horno estuvo en temperaturas de aproximadamente un rango de 500 °C -1 400 °C, que comprendió el rango de temperatura de volatilización del cloro en forma de cloruro de potasio y cloruro de sodio.

En la tabla LII, se observó que cantidad de acumulación de material en el sistema de la segunda prueba experimental fue menor a comparación de la primera experimental, a pesar que el ingreso total de cloro en el sistema fue de aproximadamente 393,48 gramos de cloro por tonelada de clinker. Por tanto, la mayor acumulación de material fue por parte del cloro con un 60 % de material de acumulación en el sistema, por lo que únicamente menos del 40 % de cloro era egresado principalmente por el polvo del filtro y las emisiones de gases en el la chimenea de la torre de ciclones, debido a que se analizó que en clinker la cantidad de cloro que egresa fue insignificante, debido a que la temperatura de salida de clinker sobrepasó los 1 200 °C que significó la volatilización de cloro en forma de cloruros dentro del horno.

En la tabla LIV, se mostró la relación álcali-cloro/azufre en clinker del sistema a dos diferentes estados que fueron de 229,83 y 265,73 gramos de cloro por tonelada de clinker que proviene únicamente por parte del combustible alterno que fue suministrado en el sistema durante las pruebas experimentales de aproximadamente 8 horas cada una.

Por lo tanto, se analizó que las relaciones álcali-cloro/azufre en clinker del sistema no variaron significativamente en función de la diferencia de cantidad de cloro que fue suministrado al sistema del horno, por lo que la diferencia fue menos del 2 %. Esto principalmente podría haber pasado debido a que la cantidad de cloro en clinker que salió del sistema fue exactamente cero según los análisis realizados en el laboratorio de calidad, por consiguiente, la cantidad óxido de sodio, óxido de potasio y óxido sulfúrico en clinker no se observó alterado a pesar de la diferencia de cloro en los dos estados experimentales.

Sin embargo, la cantidad de azufre en clinker mostró que la calidad de clinker que es producido por el horno durante la alimentación de combustible alterno no se observó alterada o perjudicada, debido a que el rendimiento del horno durante las pruebas experimentales disminuyó en un 2 % de las condiciones normales de operación; por lo tanto, se aseguró que la oxigenación del sistema fuera suficiente para garantizar una buena combustión dentro del sistema.

En la tabla LV, se observó que la comparación de cloro en harina caliente y en clinker se realizó en unidades de gramos de cloro por tonelada de clinker. La medición de cloro en harina caliente se utilizó como un parámetro de aviso de altas concentraciones de cloro en el sistema, también, una señal de alerta posibles atoramientos en el horno por material.

La cantidad de cloro en clinker en la prueba experimental fue sinónimo de la cantidad de cloro que se estuvo acumulado en el sistema pero se nombró esa manera debido a que una de las industrias cementeras más grandes del mundo lo llamó de esta forma.

Por lo tanto, la comparación de cloro en harina caliente como en clinker deberían ser valores iguales; por lo que se observó que la cantidad de cloro entre los dos parámetros de medición en el primer estado de 229,83 g Cl/tonelada clinker y el segundo estado de 265,73 gCl/tonelada clinker no fueron similares, debido a que la cantidad de cloro en el sistema no se reflejó por completo en la harina caliente; debido a que la temperatura del ciclón cuatro donde se tomó la muestra de harina caliente estaba aproximadamente entre 900 °C -1 000 °C, lo que significó que el estado del cloro era en su mayoría en estado gaseoso, además de la recirculación de gases en toda la torre de ciclos y el horno.

En la figura 8 que representó el primer estado de experimentación, se observó que la diferencia entre el cloro en harina caliente y el cloro en clinker fue mayor de 150 gramos de cloro por tonelada de clinker, mientras que en la figura 9, el segundo estado de experimentación, fue menor.

Por lo que el impacto de cloro en el horno de fabricación de clinker fue mayor para el segundo estado, es decir, que con una mayor cantidad de ingreso de cloro, con un mayor ingreso de combustible alterno se obtuvo una mayor concentración de cloro en harina caliente. Además, la circulación de gases volátiles dentro del sistema se encontraba mayormente enriquecido, lo que influenció el egreso de mayor cantidad de cloro en las emisiones de gases; lo que rebalsó el máximo de concentración permisible de 10 mg/Nm³ a comparación del primer estado de experimentación.

La evaluación del cloro y azufre en harina caliente fue muy importante durante la prueba experimental debido a que esta herramienta describió el estado de acumulación de material de forma gráfica, que se reflejó en la limpieza de ciclones del sistema del horno. Como se analizó en los valores de cloro y óxido sulfúrico en harina caliente que se observó en la tabla LVI en función de diferentes ingresos de cloro al sistema.

Por esta razón, en la figura 10 se observó la evaluación de cloro en harina caliente del primer estado experimental lo que indicó que se estaba sobre la línea de color verde que significó una zona fuera de atoramientos en el horno; mientras que se estuvo ubicado en un área con acumulaciones y una limpieza en ciclones ligera.

Se compararon los resultados de la figuras 10 y 11 que representó el segundo estado experimental con un mayor ingreso de cloro al sistema; por lo cual se ubicó dentro de la misma zona de acumulación de material con la limpieza liviana a diferencia que el punto de evaluación estuvo más inducido a tener acumulaciones de material en el ciclón, lo que se observó en una mayor concentración de cloro en la harina caliente.

CONCLUSIONES

1. Se determinó que el ingreso y egreso total de cloro en el sistema varió en función de diferentes concentraciones de cloro en el combustible alterno como a 229,83 gramos de cloro por tonelada de Clinker, se suministró 0,036 % cloro con un egreso de 0,0107 % cloro y para 265,73 gramos de cloro por tonelada de clinker de combustible alterno la entrada total fue de 0,0394 % cloro con una salida de 0,0159 % cloro.
2. Se determinó que no existió una diferencia significativa del ingreso total de cloro en función de la cantidad de cloro suministrado por el combustible alterno; mientras que sí existió una diferencia significativa de la cantidad total de cloro egresado del sistema.
3. Se determinó que no existió una diferencia significativa de la relación álcali-cloro/azufre en clinker del sistema a dos diferentes suministros de cloro en combustible alterno a 229,83 y 265,73 gramos de cloro por tonelada de clinker, el valor estuvo entre el rango de 0,69 – 0,70.
4. Se comparó que el cloro en harina caliente fue menor para el suministro de 229,83 gCl/ Tclinker que para un ingreso de 265,73 gCl/ Tclinker; sin embargo, el cloro en clinker fue mayor, debido a un mayor egreso de cloro por medio de las emisiones de gases y el polvo del filtro.
5. Se evaluó que la situación impactó del cloro en el horno para la fabricación de Clinker, para un suministro de 229,83 gCl/ Tclinker fue menor en un punto de (1,70 % SO₃, 0,37 %Cl) que para una alimentación de 265,73 gCl/ Tclinker con un valor de (1,87 % SO₃, 0,45 %Cl).

RECOMENDACIONES

1. Determinar la cantidad de ingreso y egreso de cloro en el sistema del horno a las mismas condiciones de alimentación de combustible alterno que se trabajó en la presente investigación, con la diferencia de variar el rendimiento del horno durante la prueba.
2. Evaluar la posibilidad de habilitar el muestreador automático de cloro para el horno de la línea dos, con fines de evitar cualquier accidente y tener una muestra con una mayor confiabilidad.
3. Realizar un estudio de curvas isométricas de cantidad de ingreso de cloro por parte del combustible alterno en el sistema que permita predecir la concentración de cloro en harina caliente en función de la cantidad de cloro que se suministre en el sistema.
4. Mantener una granulometría de material en el sistema mayor 100 g/L del combustible alterno para que el material sea más denso y pueda fluir sin inconvenientes.
5. Mantener la calidad del combustible alterno en sus características fisicoquímicas para evitar una variabilidad en el sistema del horno.

BIBLIOGRAFÍA

1. ARMATYS, Kamila Anna. *Thermochemical characterisation of the gas circulation in the relevant cement industry processes*. Polonia: Faculty of Natural and Material Science Clausthal University of Thecnology, 2013. 403 p.
2. CAJAS ARENAS, Denise. *Estudio de factibilidad para el coprocesamiento de las aguas de sentina en plantas cementeras*. Ecuador: Escuela Superior Politécnica de Litoral Espol, 2006. 593 p.
3. GONZALEZ CARRANZA, Yadiera. *Caracterización de costras y anillos en hornos rotatorios de cemento*. Nuevo León, México: Universidad Autónoma de Nuevo León, 1999. 410 p.
4. H. Ritzmann. *Ciclos en sistemas de hornos rotativos*. [En línea]. <http://legalaliens.eu/cone_crusher/2014-hornos-rotativos/>. [Consulta: 11 de octubre de 2016].
5. KARSTENSEN, Kåre Helge. *Formación, emisión y control de dioxinas en hornos de cemento*. Oslo, Noruega: Fundación de Investigación Científica e Industrial (Sintef), 2007. 603 p.
6. LÓPEZ DÍAZ, A.. *Mejora del rendimiento en una cementera mediante el empleo de combustibles alternativos*. España: Revista Electrónica de Medioambiente ucm, 2012. 95 p.

7. NIEVOLL, Josef. *Sulphur, spurrite and rings-always a headache for the cement kiln operator*. [En línea]. <<https://es.scribd.com/document/336541629/Sulphur-Spurrite-and-Rings-in-cement-kilns-pdf>>. [Consulta: 11 de octubre de 2016].
8. PAULING, Dirk. *Guide for application of the alkali/sulfur/chlorine*. Suiza: Holcim Group Support Ltd, 2006. 186 p.
9. P. M., Chinyama. *Alternative fuels in cement manufacturing*. Malawi: University of Malawi-the Polytechnic, 2011. 203 p.
10. PISARONI, Michele. *Optimal combustion of counteract ring formation in rotary kilns*. the netherlands, Países Bajos: Scientific Computing Group, Delft Institute of Applied Mathematics, 2012. 506 p.
11. SANTANA FERNÁNDEZ, Miguel. *búsqueda y aplicaciones de combustibles alternativos para la industria cementera de la comunidad de valencia*. Valencia, España: Universidad Politécnica de Valencia, 2011. 306 p.

APÉNDICES

Apéndice 1. Concentración entrada de óxido de sodio (Na₂O) y óxido de potasio (K₂O) base clinker a 229,83 gramos de cloro por tonelada de clinker

Fecha	Hora	Harina cruda	
		K ₂ O (%)	Na ₂ O (%)
11/12/2017	12:00	0,817	0,327
11/12/2017	13:00	0,824	0,214
11/12/2017	14:00	0,841	0,313
11/12/2017	15:00	0,845	0,365
11/12/2017	16:00	0,843	0,314
11/12/2017	17:00	0,846	0,315
11/12/2017	18:00	0,828	0,348
11/12/2017	19:00	0,813	0,332

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. Concentración entrada de óxido de sulfúrico (SO₃) base clinker a 229,83 gramos de cloro por tonelada de clinker

Fecha	Hora	Harina cruda SO ₃ (%)	Pet coke SO ₃ (%)	Bunker SO ₃ (%)	Combustible alternativo SO ₃ (%)	Total SO ₃ (%)
11/12/2017	12:00	0,58	1,30	0,063	0,013	1,96
11/12/2017	13:00	0,57	1,31	0,065	0,020	1,97
11/12/2017	14:00	0,61	1,31	0,060	0,021	2,00
11/12/2017	15:00	0,56	1,31	0,061	0,024	1,96
11/12/2017	16:00	0,59	1,32	0,066	0,004	1,99
11/12/2017	17:00	0,56	1,31	0,067	0,012	1,95
11/12/2017	18:00	0,61	1,31	0,070	0,016	2,01
11/12/2017	19:00	0,58	1,31	0,063	0,013	1,97

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. Concentración entrada de cloro base clinker a 229,83 gramos de cloro por tonelada de clinker

Fecha	Hora	Harina cruda Cl(%)	Pet coke Cl(%)	Bunker Cl (%)	Combustible alterno Cl(%)	Total Cl(%)
11/12/2017	12:00	0,000	0,011	0,001	0,018	0,029
11/12/2017	13:00	0,000	0,014	0,001	0,017	0,031
11/12/2017	14:00	0,000	0,014	0,001	0,016	0,031
11/12/2017	15:00	0,000	0,011	0,000	0,029	0,041
11/12/2017	16:00	0,000	0,011	0,001	0,040	0,051
11/12/2017	17:00	0,000	0,011	0,001	0,026	0,037
11/12/2017	18:00	0,000	0,011	0,001	0,023	0,034
11/12/2017	19:00	0,000	0,014	0,001	0,015	0,030

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. Concentración salida de óxido de potasio (K₂O) base clinker a 229,83 gramos de cloro por tonelada de clinker

Fecha	Hora	Clinker K ₂ O (%)	Polvo del filtro K ₂ O (%)	Total K ₂ O (%)
11/12/2017	12:00	0,60	0,08	0,68
11/12/2017	13:00	0,73	0,08	0,81
11/12/2017	14:00	0,70	0,08	0,78
11/12/2017	15:00	0,65	0,08	0,73
11/12/2017	16:00	0,65	0,08	0,73
11/12/2017	17:00	0,68	0,08	0,76
11/12/2017	18:00	0,69	0,08	0,77
11/12/2017	19:00	0,65	0,08	0,73

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 5. Concentración salida de óxido de sodio (Na₂O) base clinker a 229,83 gramos de cloro por tonelada de clinker

Fecha	Hora	Clinker Na ₂ O (%)	Polvo del filtro Na ₂ O (%)	Total Na ₂ O (%)
11/12/2017	12:00	0,28	0,02	0,30
11/12/2017	13:00	0,28	0,02	0,30
11/12/2017	14:00	0,28	0,02	0,30
11/12/2017	15:00	0,28	0,02	0,30
11/12/2017	16:00	0,27	0,03	0,30
11/12/2017	17:00	0,28	0,02	0,30
11/12/2017	18:00	0,30	0,02	0,32
11/12/2017	19:00	0,29	0,03	0,32

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 6. Concentración salida de óxido de sulfúrico (SO₃) base clinker a 229,83 gramos de cloro por tonelada de clinker

Fecha	Hora	Clinker SO ₃ (%)	Polvo del filtro SO ₃ (%)	Emisiones de gases SO ₃ (%)	Total SO ₃ (%)
11/12/2017	12:00	1,23	0,06	0,00	1,29
11/12/2017	13:00	1,59	0,05	0,00	1,64
11/12/2017	14:00	1,41	0,05	0,00	1,46
11/12/2017	15:00	1,28	0,05	0,00	1,33
11/12/2017	16:00	1,29	0,05	0,00	1,34
11/12/2017	17:00	1,35	0,06	0,00	1,41
11/12/2017	18:00	1,40	0,06	0,00	1,46
11/12/2017	19:00	1,30	0,05	0,00	1,35

Fuente: elaboración propia.

**Apéndice 7. Concentración salida de cloro base clinker a 229,83
gramos de cloro por tonelada de clinker**

Fecha	Hora	Clinker Cl(%)	Polvo del filtro Cl(%)	Emisiones de gases Cl(%)	Total Cl(%)
11/12/2017	12:00	0,00	0,01	0,00	0,01
11/12/2017	13:00	0,00	0,01	0,00	0,01
11/12/2017	14:00	0,00	0,01	0,00	0,01
11/12/2017	15:00	0,00	0,01	0,00	0,01
11/12/2017	16:00	0,00	0,00	0,00	0,01
11/12/2017	17:00	0,00	0,00	0,00	0,01
11/12/2017	18:00	0,00	0,01	0,00	0,01
11/12/2017	19:00	0,00	0,01	0,00	0,01

Fuente: elaboración propia.

**Apéndice 8. Consumo térmico del petcoke a 229,83 gramos de cloro
por tonelada de clinker**

Fecha	Hora	Poder calorífico (kJ/kg)	Flujo másico(T/h)	GJ/h
11/12/2017	12:00	33 780,0	7,6	228,9
11/12/2017	13:00	34 073,0	7,6	228,9
11/12/2017	14:00	33 722,0	7,6	228,9
11/12/2017	15:00	32 743,0	7,6	228,9
11/12/2017	16:00	32 954,0	7,7	228,9
11/12/2017	17:00	32 278,0	7,6	228,9
11/12/2017	18:00	33 420,0	7,6	228,9
11/12/2017	19:00	32 897,0	7,6	228,9

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 9. **Poder calorífico del bunker a 229,83 gramos de cloro por tonelada de clinker**

Fecha	Hora	Poder calorífico (kJ/kg)	Flujo másico(T/h)	GJ/h
11/12/2017	12:00	42 471,0	0,8	35,4
11/12/2017	13:00	42 396,0	0,9	35,4
11/12/2017	14:00	42 123,0	0,8	35,4
11/12/2017	15:00	42 164,0	0,8	35,4
11/12/2017	16:00	42 568,0	0,9	35,4
11/12/2017	17:00	42 128,0	0,9	35,4
11/12/2017	18:00	42 423,0	0,9	35,4
11/12/2017	19:00	42 553,0	0,8	35,4

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 10. **Poder calorífico de combustible alternativo a 229,83 gramos de cloro por tonelada de clinker**

Fecha	Hora	Poder Calorífico (kJ/kg)	Flujo másico(T/h)	GJ/h
11/12/2017	12:00	16 543,0	0,85	14,1
11/12/2017	13:00	18 742,0	0,85	15,9
11/12/2017	14:00	18 855,0	0,85	16,0
11/12/2017	15:00	19 851,0	0,84	16,7
11/12/2017	16:00	17 566,0	0,89	15,7
11/12/2017	17:00	20 497,0	0,86	17,6
11/12/2017	18:00	20 740,0	0,85	17,7
11/12/2017	19:00	21 167,0	0,85	18,0

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 11. **Consumo térmico a 229,83 gramos de cloro por tonelada de clinker**

Fecha	Hora	Poder calorífico (kJ/kg)	Flujo másico(T/h)	GJ/h
11/12/2017	12:00	16 543,0	0,85	14,1
11/12/2017	13:00	18 742,0	0,85	15,9
11/12/2017	14:00	18 855,0	0,85	16,0
11/12/2017	15:00	19 851,0	0,84	16,7
11/12/2017	16:00	17 566,0	0,89	15,7
11/12/2017	17:00	20 497,0	0,86	17,6
11/12/2017	18:00	20 740,0	0,85	17,7
11/12/2017	19:00	21 167,0	0,85	18,0

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 12. **Emisiones de ácido clorhídrico (HCl) a 229,83 gramos de cloro por tonelada de clinker**

Fecha	Hora	Base Seca Nm ³ /kg clinker	HCl ppm	HCl mg/Kg clinker	Cl mg/kg clinker	Cl (%) %base clinker
11/12/2017	12:00	1,86	9,33	28,27	27,50	0,00275
11/12/2017	13:00	1,90	9,80	30,32	29,50	0,00295
11/12/2017	14:00	1,90	9,70	30,02	29,21	0,00292
11/12/2017	15:00	1,92	10,30	32,16	31,29	0,00313
11/12/2017	16:00	2,04	9,96	33,03	32,13	0,00321
11/12/2017	17:00	2,05	9,96	33,24	32,35	0,00323
11/12/2017	18:00	2,00	10,29	33,51	32,60	0,00326
11/12/2017	19:00	2,10	10,29	35,27	34,31	0,00343

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 13. Emisiones de óxido sulfúrico (SO₃) a 229,83 gramos de cloro por tonelada de clinker

Fecha	Hora	Base seca Nm ³ /kg cli	SO ₂ ppm	SO ₂ mg/kg clinker	SO ₃ mg/kg clinker	SO ₃ (%) %base clinker
11/12/2017	12:00	1,86	0	0,00	0,00	0,00000
11/12/2017	13:00	1,90	0	0,00	0,00	0,00000
11/12/2017	14:00	1,90	0	0,00	0,00	0,00000
11/12/2017	15:00	1,92	0	0,00	0,00	0,00000
11/12/2017	16:00	2,04	0	0,00	0,00	0,00000
11/12/2017	17:00	2,05	0	0,00	0,00	0,00000
11/12/2017	18:00	2,00	0	0,00	0,00	0,00000
11/12/2017	19:00	2,10	0	0,00	0,00	0,00000

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 14. Concentración de cloro en harina caliente y cloro en clinker a 229,83 gramos de cloro por tonelada de clinker

Fecha	Hora	Cl H. M. gCl/ T clinker	Cl clinker gCl/ T clinker
11/12/2017	12:00	59,64	158,61
11/12/2017	13:00	56,42	193,18
11/12/2017	14:00	69,08	223,54
11/12/2017	15:00	81,96	271,55
11/12/2017	16:00	68,84	436,61
11/12/2017	17:00	90,72	290,84
11/12/2017	18:00	81,42	248,67
11/12/2017	19:00	79,88	164,71

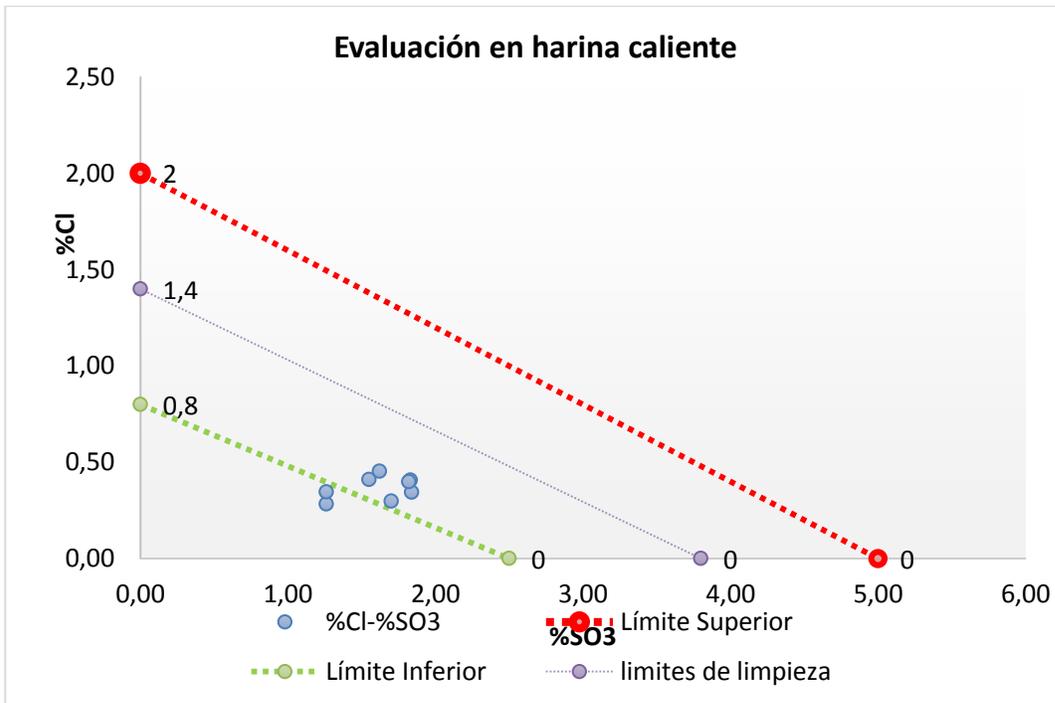
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 15. **Concentración de cloro y óxido de sulfúrico (SO₃) a 229,83 gramos de cloro por tonelada de clinker**

Fecha	Hora	Cl(%)	SO ₃ (%)
11/12/2017	12:00	0,30	1,70
11/12/2017	13:00	0,28	1,26
11/12/2017	14:00	0,35	1,26
11/12/2017	15:00	0,41	1,55
11/12/2017	16:00	0,34	1,84
11/12/2017	17:00	0,45	1,62
11/12/2017	18:00	0,41	1,83
11/12/2017	19:00	0,40	1,82

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 16. **Comportamiento de evaluación de cloro y óxido de sulfúrico (SO₃) a 229,83 gramos de cloro por tonelada de clinker**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 17. **Alimentación de combustible alternativo en la prueba experimental con un ingreso de 229,83 gramos de cloro por tonelada de clinker**



Fuente: elaboración propia.

12.

Apéndice 18. **Muestreo en la prueba experimental con un ingreso de 229,83 gramos de cloro por tonelada de clinker**

Descripción	Fotografía
Harina cruda	
Harina caliente	
Petcoke	
Combustible alterno	

Continuación del apéndice 18.

<p>Búnker</p>	
<p>Clinker</p>	
<p>Polvo del filtro</p>	

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 19. **Concentración de entrada de óxido de sodio (Na₂O) y óxido de potasio (K₂O) base clinker a 265,73 gramos de cloro por tonelada de clinker**

Fecha	Hora	Harina cruda	
		K ₂ O (%)	Na ₂ O (%)
02/02/2018	8:00:00	0,77	0,33
02/02/2018	9:00:00	0,78	0,31
02/02/2018	10:00:00	0,78	0,32
02/02/2018	11:00:00	0,78	0,33
02/02/2018	12:00:00	0,78	0,33
02/02/2018	13:00:00	0,77	0,33
02/02/2018	14:00:00	0,77	0,32
02/02/2018	15:00:00	0,76	0,33

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 20. **Concentración de entrada de óxido de sulfúrico (SO₃) base clinker a 265,73 gramos de cloro por tonelada de clinker**

Fecha	Hora	Harina cruda SO ₃ (%)	Pet coke SO ₃ (%)	Bunker SO ₃ (%)	Combustible alternativo SO ₃ (%)	Total SO ₃ (%)
02/02/2018	8:00:00	0,58	1,34	0,07	0,01	1,99
02/02/2018	9:00:00	0,62	1,35	0,06	0,01	2,04
02/02/2018	10:00:00	0,67	1,35	0,06	0,01	2,08
02/02/2018	11:00:00	0,58	1,34	0,06	0,01	1,99
02/02/2018	12:00:00	0,59	1,35	0,06	0,01	2,00
02/02/2018	13:00:00	0,61	1,39	0,05	0,01	2,07
02/02/2018	14:00:00	0,60	1,40	0,04	0,01	2,04
02/02/2018	15:00:00	0,64	1,41	0,03	0,01	2,09

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 21. Concentración de entrada de cloro base clinker a 265,73 gramos de cloro por tonelada de clinker

Fecha	Hora	Harina cruda Cl(%)	Pet Coke Cl(%)	Bunker Cl (%)	Combustible alternativo Cl(%)	Total Cl(%)
02/02/2018	8:00:00	0,00	0,01	0,00	0,03	0,039
02/02/2018	9:00:00	0,00	0,01	0,00	0,02	0,035
02/02/2018	10:00:00	0,00	0,01	0,00	0,02	0,038
02/02/2018	11:00:00	0,00	0,01	0,00	0,03	0,040
02/02/2018	12:00:00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,025
02/02/2018	13:00:00	0,00	0,01	0,00	0,06	0,068
02/02/2018	14:00:00	0,00	0,01	0,00	0,02	0,036
02/02/2018	15:00:00	0,00	0,01	0,00	0,02	0,036

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 22. Concentración salida de óxido de potasio (K₂O) base clinker a 265,73 gramos de cloro por tonelada de clinker

Fecha	Hora	Clinker K ₂ O (%)	Polvo del filtro K ₂ O (%)	Total K ₂ O (%)
02/02/2018	8:00	0,62	0,07	0,69
02/02/2018	9:00	0,64	0,08	0,72
02/02/2018	10:00	0,68	0,07	0,75
02/02/2018	11:00	0,67	0,08	0,75
02/02/2018	12:00	0,74	0,08	0,82
02/02/2018	13:00	0,67	0,07	0,74
02/02/2018	14:00	0,67	0,07	0,74
02/02/2018	15:00	0,73	0,07	0,80

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 23. **Concentración salida de óxido de sodio (Na₂O) base clinker a 229,83 gramos de cloro por tonelada de clinker**

Fecha	Hora	Clinker Na ₂ O (%)	Polvo del filtro Na ₂ O (%)	Total Na ₂ O (%)
02/02/2018	8:00	0,34	0,02	0,36
02/02/2018	9:00	0,37	0,02	0,39
02/02/2018	10:00	0,34	0,02	0,36
02/02/2018	11:00	0,37	0,02	0,39
02/02/2018	12:00	0,39	0,02	0,41
02/02/2018	13:00	0,37	0,02	0,39
02/02/2018	14:00	0,36	0,02	0,38
02/02/2018	15:00	0,38	0,02	0,40

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 24. **Concentración salida de óxido de sulfúrico (SO₃) base clinker a 265,73 gramos de cloro por tonelada de clinker**

Fecha	Hora	Clinker SO ₃ (%)	Polvo del filtro SO ₃ (%)	Emisiones de gases SO ₃ (%)	Total SO ₃ (%)
02/02/2018	8:00	1,37	0,05	0,00	1,42
02/02/2018	9:00	1,36	0,05	0,00	1,41
02/02/2018	10:00	1,45	0,05	0,00	1,50
02/02/2018	11:00	1,51	0,05	0,00	1,56
02/02/2018	12:00	1,78	0,05	0,00	1,83
02/02/2018	13:00	1,45	0,05	0,00	1,50
02/02/2018	14:00	1,47	0,05	0,00	1,52
02/02/2018	15:00	1,55	0,05	0,00	1,60

Fuente: elaboración propia.

**Apéndice 25. Concentración salida de cloro base clinker a 265,73
gramos de cloro por tonelada de clinker**

Fecha	Hora	Clinker Cl (%)	Polvo del filtro Cl(%)	Emisiones de gases Cl(%)	Total Cl(%)
02/02/2018	8:00	0,00	0,01	0,00	0,01
02/02/2018	9:00	0,00	0,01	0,00	0,01
02/02/2018	10:00	0,00	0,01	0,00	0,01
02/02/2018	11:00	0,00	0,01	0,00	0,01
02/02/2018	12:00	0,00	0,01	0,00	0,01
02/02/2018	13:00	0,00	0,01	0,00	0,01
02/02/2018	14:00	0,00	0,01	0,00	0,01
02/02/2018	15:00	0,00	0,01	0,00	0,01

Fuente: elaboración propia.

**Apéndice 26. Consumo térmico del petcoke a 265,73 gramos de cloro
por tonelada de clinker**

Fecha	Hora	Poder calorífico (kJ/kg)	Flujo másico(T/h)	GJ/h
02/02/2018	8:00	33 780,00	7,69	240,43
02/02/2018	9:00	34 073,00	7,69	240,43
02/02/2018	10:00	33 722,00	7,69	240,43
02/02/2018	11:00	32 743,00	7,69	240,43
02/02/2018	12:00	32 954,00	7,69	240,43
02/02/2018	13:00	32 278,00	8,00	240,43
02/02/2018	14:00	33 420,00	7,97	240,43
02/02/2018	15:00	32 897,00	8,06	240,43

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 27. **Poder calorífico del bunker a 265,73 gramos de cloro por tonelada de clinker**

Fecha	Hora	Poder calorífico (kJ/kg)	Flujo másico(T/h)	GJ/h
02/02/2018	8:00	42 299,00	0,94	25,54
02/02/2018	9:00	42 634,00	0,92	25,54
02/02/2018	10:00	42 875,00	0,86	25,54
02/02/2018	11:00	42 763,00	0,88	25,54
02/02/2018	12:00	42 753,00	0,83	25,54
02/02/2018	13:00	42 791,00	0,77	25,54
02/02/2018	14:00	42 711,00	0,58	25,54
02/02/2018	15:00	42 686,00	0,48	25,54

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 28. **Poder calorífico de combustible alterno a 265,73 gramos de cloro por tonelada de clinker**

Fecha	Hora	Poder calorífico (kJ/kg)	Flujo másico(T/h)	GJ/h
02/02/2018	8:00	17 464,00	1,05	18,38
02/02/2018	9:00	19 368,00	1,04	20,17
02/02/2018	10:00	12 023,00	1,05	12,57
02/02/2018	11:00	17 832,00	1,05	18,72
02/02/2018	12:00	19 595,00	1,04	20,43
02/02/2018	13:00	15 066,00	1,04	15,71
02/02/2018	14:00	17 726,00	1,05	18,53
02/02/2018	15:00	17 135,00	1,05	17,96

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 29. **Consumo térmico a 265,73 gramos de cloro por tonelada de clinker**

Fecha	Hora	(GJ/h)	kJ/kg clinker
02/02/2018	8:00	284,35	3 723,05
02/02/2018	9:00	286,14	3 737,62
02/02/2018	10:00	278,54	3 650,55
02/02/2018	11:00	284,69	3 719,17
02/02/2018	12:00	286,40	3 747,87
02/02/2018	13:00	281,68	3 676,50
02/02/2018	14:00	284,50	3 715,49
02/02/2018	15:00	283,93	3 708,99

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 30. **Emisiones de ácido clorhídrico (HCl) a 229,83 gramos de cloro por tonelada de clinker**

Fecha	Hora	Base seca Nm ³ /kg clinker	HCl ppm	HCl mg/kg clinker	Cl mg/kg clinker	Cl (%) %base clinker
02/02/2018	8:00	1,85	8,36	25,25	24,57	0,0025
02/02/2018	9:00	1,79	12,29	35,93	34,96	0,0035
02/02/2018	10:00	1,93	12,67	39,75	38,68	0,0039
02/02/2018	11:00	1,97	13,60	43,63	42,45	0,0042
02/02/2018	12:00	2,00	11,53	37,52	36,51	0,0037
02/02/2018	13:00	1,95	11,08	35,23	34,27	0,0034
02/02/2018	14:00	2,05	10,30	34,35	33,42	0,0033
02/02/2018	15:00	2,04	10,64	35,46	34,50	0,0035

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 31. **Emisiones de óxido sulfúrico (SO₃) a 229,83 gramos de cloro por tonelada de clinker**

Fecha	Hora	Base seca Nm ³ /kg clinker	SO ₂ ppm	SO ₂ mg/kg clinker	SO ₃ mg/kg clinker	SO ₃ (%) %base clinker
02/02/2018	8:00	1,85	0,00	0,00	0,00	0,00
02/02/2018	9:00	1,79	0,00	0,00	0,00	0,00
02/02/2018	10:00	1,93	0,00	0,00	0,00	0,00
02/02/2018	11:00	1,97	0,24	1,34	1,67	0,00
02/02/2018	12:00	2,00	0,12	0,66	0,82	0,00
02/02/2018	13:00	1,95	0,35	1,93	2,41	0,00
02/02/2018	14:00	2,05	0,01	0,06	0,08	0,00
02/02/2018	15:00	2,04	0,03	0,16	0,20	0,00

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 32. **Concentración de cloro en harina caliente y cloro en clinker a 265,73 gramos de cloro por tonelada de clinker**

Fecha	Hora	Cl H. M. gCl/Tclinker	Cl clinker gCl/Tclinker
02/02/2018	8:00	98,48	245,90
02/02/2018	9:00	85,32	183,96
02/02/2018	10:00	81,68	218,45
02/02/2018	11:00	91,72	235,83
02/02/2018	12:00	67,04	82,14
02/02/2018	13:00	101,88	508,94
02/02/2018	14:00	107,46	197,55
02/02/2018	15:00	118,54	210,59

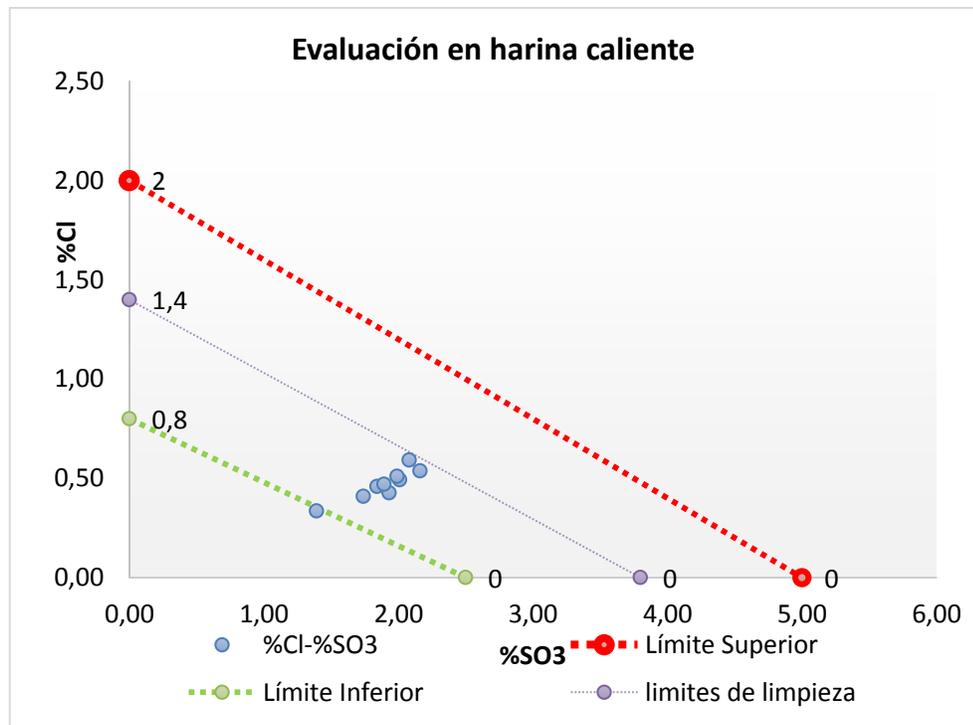
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 33. **Concentración cloro y óxido de sulfúrico (SO₃) a 265,73 gramos de cloro por tonelada de clinker**

Fecha	Hora	Cl(%)	SO ₃ (%)
02/02/2018	8:00	0,49	2,01
02/02/2018	9:00	0,43	1,93
02/02/2018	10:00	0,41	1,74
02/02/2018	11:00	0,46	1,84
02/02/2018	12:00	0,34	1,39
02/02/2018	13:00	0,51	1,99
02/02/2018	14:00	0,54	2,16
02/02/2018	15:00	0,59	2,08

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 34. **Comportamiento de evaluación de cloro y óxido de sulfúrico (SO₃) a 265,73 gramos de cloro por tonelada de clinker**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 35. **Alimentación de combustible alternativo en la prueba experimental con un ingreso de 265,73 gramos de cloro por tonelada de clinker**

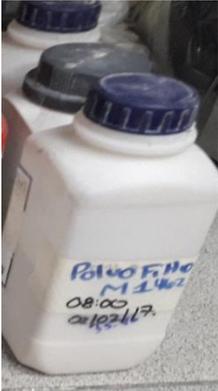


Fuente: elaboración propia.

Apéndice 36. **Muestreo en la prueba experimental con un ingreso de 229,83 gramos de cloro por tonelada de clinker**

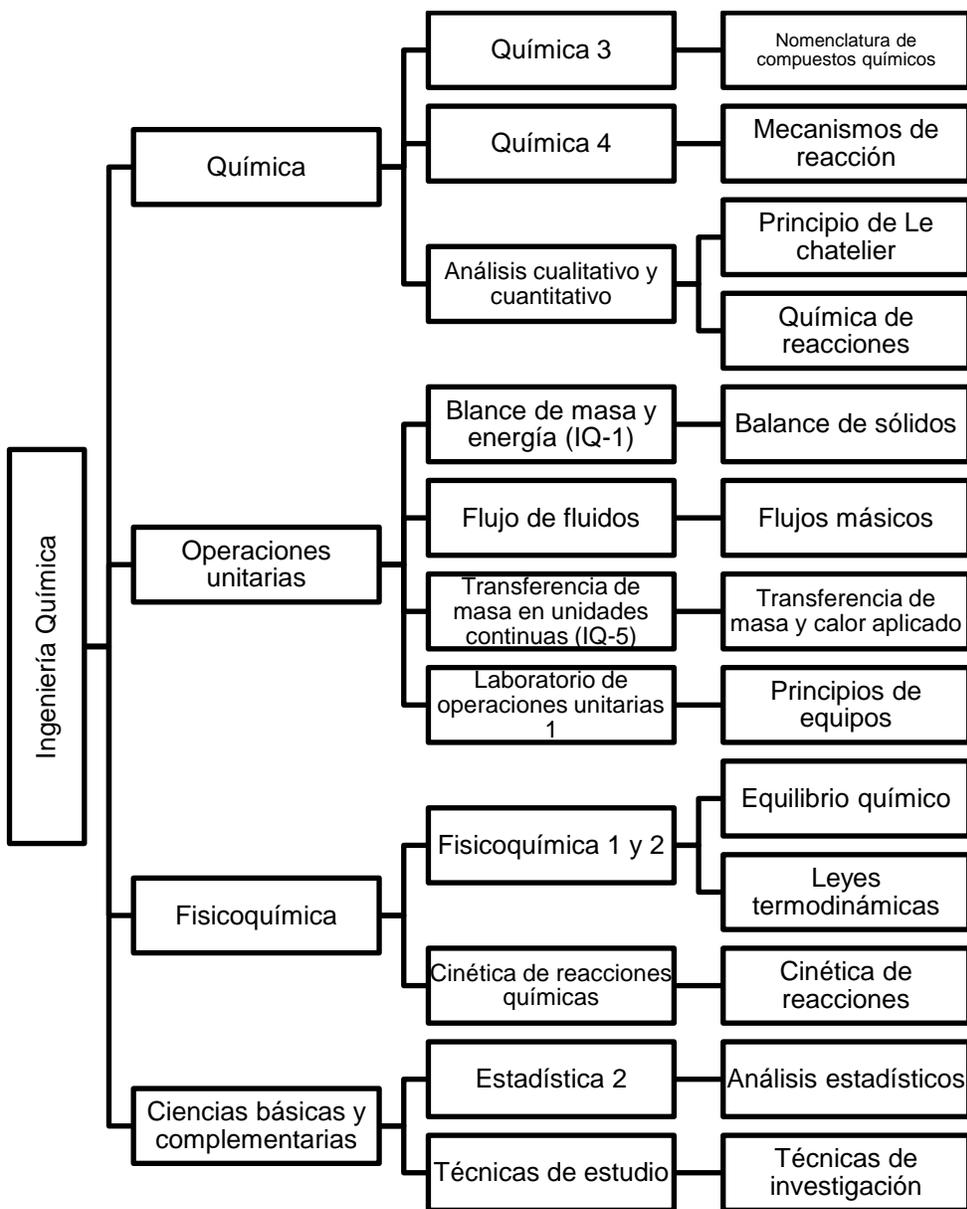
Descripción	Fotografía
Harina cruda	
Harina caliente	
Petcoke	

Continuación del apéndice 36.

<p>Combustible alternativo</p>	
<p>Clinker</p>	
<p>Polvo del filtro</p>	

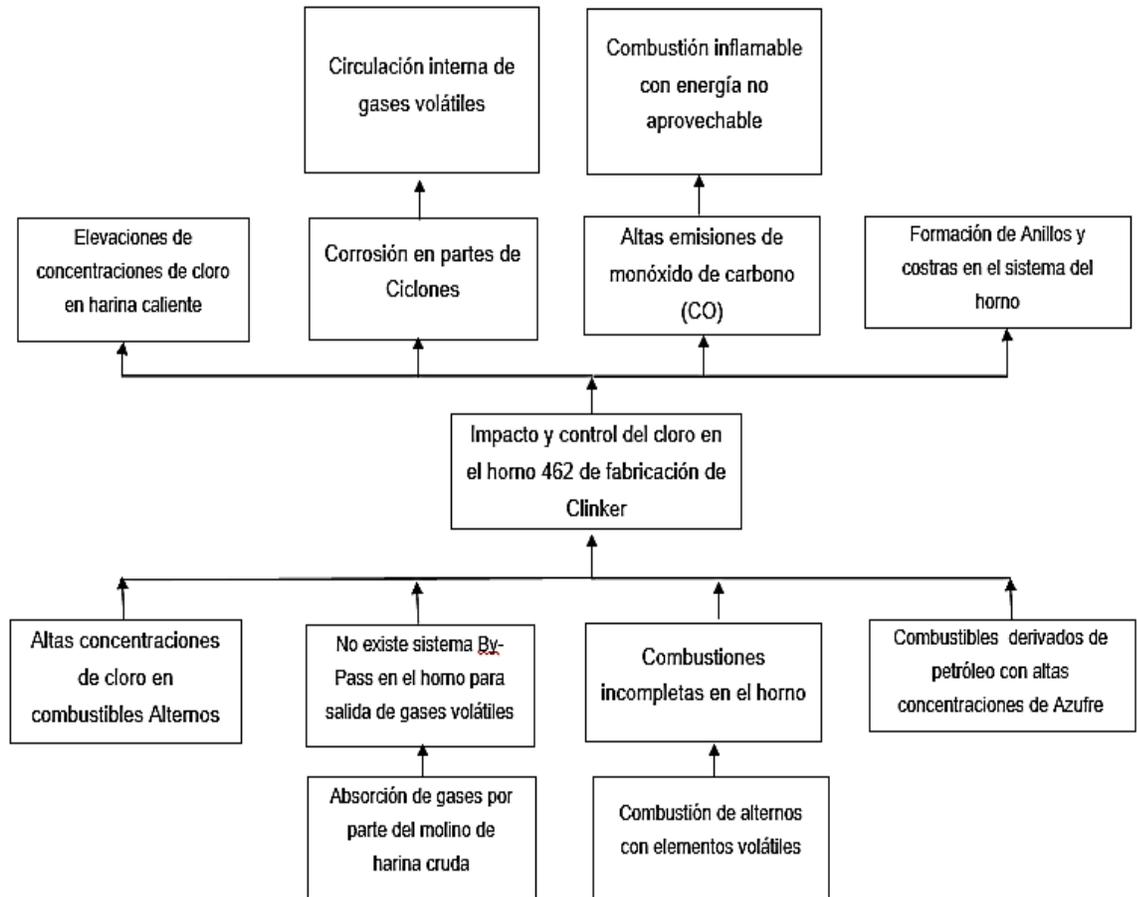
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 37. **Requisitos académicos**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 38. **Árbol de problemas**



Fuente: elaboración propia.