



25
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
ZARAGOZA

FALLA DE ORIGEN

Aprovechamiento de Residuos Industriales
como Combustibles Alternos
en Hornos Cementeros

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO QUIMICO

PRESENTA:

Jorge Luis Martínez Ocampo

ASESOR:

Ing. Benjamín Rangel Granados



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES *ZARAGOZA*

JEFATURA DE LA CARRERA
DE INGENIERIA QUIMICA

OF/IQ/JU/062/043/95

MARTINEZ OCAMPO JORGE LUIS
P R E S E N T E.

En respuesta a su solicitud de asignación de jurado para el Examen Profesional, les comunico que la Jefatura a mi cargo ha propuesto la siguiente designación:

PRESIDENTE:	ING. EDUARDO VAZQUEZ ZAMORA
VOCAL:	ING. JOSE BENJAMIN RANGEL GRANADOS
SECRETARIO:	ING. LORENZO ROJAS HERNANDEZ
SUPLENTE:	ING. ESTEBAN MINOR PEREZ
SUPLENTE:	ING. ANDRES AQUINO CANCHOLA

A T E N T A M E N T E
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

México, D.F., 18 de septiembre 1995


ING. JOSE BENJAMIN RANGEL GRANADOS
JEFE DE LA CARRERA

Irr

☆ A mis Padres:

Carlos y Adela

Porque me apoyaron en mi formación profesional

☆ A mis hermanos:

Quienes con su apoyo me alentaron a seguir adelante

☆ A mi esposa Sara y a mi hija Diana Sheiny:

Por su amor, paciencia y comprensión

☆ Al Ing. Benjamin Rangel G.:

Por el apoyo que me brindó en el desarrollo de este trabajo
y por su amistad

☆ A los Ings. Eduardo Vázquez Z. y Esteban Minor P.:

Por la ayuda que me brindaron para alcanzar esta meta

Aprovechamiento de Residuos Industriales
como Combustibles Alternos
en Hornos Cementeros

Contenido:

	Pag.
1) Introducción	1
2) Generalidades	4
2.1 Antecedentes de los materiales y combustibles alternos en la industria del cemento	5
3) Proceso de producción del cemento	8
3.1 Descripción general del proceso	10
3.2 El horno cementero	25
4) Criterio de selección de combustibles alternos y su legislación ambiental	35
4.1 Los combustibles alternos	35
4.2 Selección de los combustibles alternos	39
4.3 Legislación ambiental que aplica al uso de combustibles alternos	42
5) Aseguramiento de combustible alternativo y costo de inversión.	45
5.1 Generación de aceite usado en el Estado de Tab.	45
5.2 Requerimiento de aceite lubricante usado en el horno y costo de inversión.	48
6) Protocolo de prueba de quemado	53
6.1 Actividades previas a las pruebas de quemado	53
6.2 Pruebas de quemado	58
6.3 Actividades posteriores a las pruebas de quemado	72
6.4 Normatividad	72
7) Resultados de pruebas	77
7.1 Desarrollo de las pruebas	77
7.2 Resultados de Pruebas	80
7.3 Análisis de Resultados Analíticos	92
8) Conclusiones	106
9) Bibliografía	108

Aprovechamiento de Residuos Industriales como Combustibles Alternos en Hornos Cementeros

Índice de Tablas:

Ident.	Nombre	Capítulo	Pag.
3.1	Composición química característica de las materias primas principales	3	11
3.2	Composición química característica de la harina cruda	3	14
3.3	Composición química característica del clinker	3	19
3.4	Proporcionamiento de materiales en los tipos de cemento	3	21
3.5	Composición química característica de los diferentes tipos de cemento.	3	22
3.6	Productos de incineración completa	3	31
4.1	Características típicas que debe cumplir un residuo para ser usado como combustible alternativo en un horno de cemento.	4	39
6.1	Selección del analizador por tipo de gas a medir	6	55
6.2	Variables a medir durante las pruebas de quemado	6	60
6.3	Análisis en materias primas y combustibles	6	67
6.4	Análisis de chimenea	6	69
7.1	Resumen de resultados de las pruebas de quemado (Comb. Alternativo)	7	81
7.2	Resumen de resultados de las pruebas de quemado (Comb. Convencional)	7	82
7.3	Resumen de resultado de las pruebas de quemado (chimenea 421)	7	84
7.4	Resumen de Resultados de las pruebas de Quemado (Clinker)	7	85
7.5	Resumen de resultado de las pruebas de quemado (Crudo)	7	87
7.6	Resultados de aire ambiente con monitoreo continuo	7	88
7.7	Resultados aire ambiente, muestreos no continuos	7	90
7.8	Eficiencia de destrucción de 1,2,4 Triclorobenceno	7	93
7.9	Eficiencia de remoción de Cloruros	7	94
7.10	Emissiones de Dioxinas y Furanos	7	96
7.11	Condiciones de Operación	7	97
7.12	Reporte del equipo de monitoreo continuo (CEM) Monóxido de carbono	7	99
7.13	Reporte del equipo de monitoreo continuo (CEM) Hidrocarburos totales (ppmv)	7	101
7.14	Reporte del equipo de monitoreo continuo (CEM) Cloruro de hidrógeno (ppmv)	7	102
7.15	Resultados de HCl en aire ambiente	7	104

Aprovechamiento de Residuos Industriales
como Combustibles Alternos
en Hornos Cementeros

Índice de Figuras:

Ident.	Nombre	Capítulo	Pag.
3.1	Diagrama general	3	10
3.2	Diagrama de Flujo de Cantera	3	13
3.3	Diagrama de Flujo del Molino de Crudo	3	15
3.4	Flujo de Gas en el Precalentador	3	18
3.5	Diagrama de Flujo del Horno	3	20
3.6	Diagrama de Flujo del Molino de Cemento	3	23
3.7	Tiempo de residencia de los gases de combustión en el horno	3	28
5.1	Generación de aceite usado por Municipio en el Estado de Tabasco	5	47
6.1	Continuous Emission Monitoring Systems (C E M)	6	56

Prefacio

El presente trabajo se plantea como una alternativa de solución a la problemática ambiental causada por la generación de residuos industriales.

Al usar los hornos cementeros como disposición final de residuos industriales se estará coadyuvando a disminuir la contaminación ambiental ya que se ha demostrado que al quemar estos residuos no se generan otros que puedan causar un daño al medio ambiente, las cenizas generadas son incorporadas al clinker en una forma de encapsulamiento sin afectar en ninguna forma la calidad del producto. Así mismo se contribuye a la disminución del consumo de combustibles fósiles, esto para las industrias cementeras representa una disminución en los costos de producción.

Para poder disponer de un residuo en un horno cementero, este debe cumplir con ciertas propiedades físico-químicas las cuales están en función de criterios ambientales y del propio proceso, además de contar con un permiso por parte de las autoridades ambientales. En este estudio se describen los criterios de selección de los residuos y de la legislación ambiental que aplica al uso de estos ya que generalmente son considerados como residuos peligrosos.

En la región sureste existe una gran generación de aceite usado proveniente de industrias y vehículos, la Planta Macuspana de Cementos APASCO representa una excelente alternativa para su disposición final debido a su localización geográfica. Para la implementación del proyecto se requiere de una inversión alta. Sin embargo, dependiendo del porcentaje de sustitución de combustible convencional por combustible alternativo la inversión puede ser recuperada en un tiempo no mayor de dos años.

Otro tema tratado en este trabajo es el contenido del protocolo de pruebas de quemado, el cual hay que presentar a las autoridades ambientales para la obtención del permiso para disponer residuos en el horno, su objetivo es demostrar durante un periodo de pruebas que el uso de combustibles alternos no altera la dinámica del proceso, mostrar la eficiencia de destrucción del sistema en base a un componente de difícil destrucción y que la calidad del producto no se ve afectada.

Deseo agradecer a la Planta Macuspana de Cementos APASCO por el apoyo brindado en el desarrollo de este trabajo al facilitarme su valiosa información.

Capítulo 1

Introducción

1. Introducción

Uno de los principales problemas ambientales que presenta el país es el manejo y disposición final de los residuos peligrosos, estos en la mayoría de los casos no tienen un control adecuado, ya que cifras proporcionadas por la SEMARNAP, la infraestructura con la que cuenta la nación sólo atiende al 14%.

La mayoría de los desechos peligrosos son depositados en sitios no autorizados, como el sistema de drenaje y alcantarillado, en terrenos baldíos, lechos de ríos, desiertos, mares o mezclándolos ilegalmente con residuos sólidos municipales. Debido a la peligrosa persistencia de desechos en el ambiente, y a la movilidad de una gran variedad, éstos pueden contaminar los mantos acuíferos, suelos, atmósfera y alimentos. De esta forma la población queda expuesta, cotidianamente, a una gran variedad de contaminantes.

El pequeño porcentaje de los residuos peligrosos controlados, se les da en la mayoría de las veces un confinamiento autorizado como disposición final, el país cuenta con tres confinamientos dos de los cuales se encuentran en operación y el otro se encuentra en espera de su autorización. Estos se encuentran en el norte del país.

A diferencia de las celdas de confinamiento, donde los residuos permanecen indefinitivamente en nuestro planeta, los hornos cementeros se presentan como otra alternativa en la destrucción de los residuos peligrosos, debido a sus condiciones de operación que favorecen las reacciones de combustión a elevadas temperaturas (1450 °C) para la fabricación de clínker, bajo estas condiciones cualquier residuo puede destruirse completamente sin generar otros residuos que contamine el ambiente o a la calidad del producto, lo cual no ocurriría si se quemara a cielo abierto o en otro horno sin el correcto control de operación.

Para poder quemar algunos residuos peligrosos en hornos cementeros, los primeros, deberán cumplir varias características físico-químicas, entre las más importantes están las siguientes: tener un poder calorífico mayor a 5,000

Kcal/Kg, no contener bifenilopoliclorados, no contener materiales radiactivos ni hospitalarios, tener baja concentración de cloro y azufre. En general, deberán cumplir con criterios ambientales y de control de proceso.

Debido a la alta generación de estos residuos industriales, que de acuerdo a su uso como sustituto del combustible convencional se le llama combustible alterno, se presenta este trabajo como alternativa de mejoramiento ambiental, como beneficio a las empresas cementeras en ahorro de combustible fósiles y como factor importante en costos de producción de clinker.

Este trabajo esta dividido en nueve capitulos y se desarrolló en la Planta Macuspana de Cementos APASCO localizada en el Km 68.5 de la Carretera villahermosa-Escarcega, Municipio de Macuspana Tabasco. Para la elaboración del capitulo 7, se recopiló información sobre las experiencias en la quema de estos combustibles de la Planta Ramos Arizpe del mismo Grupo. A continuación se describe brevemente el contenido de dichos capitulos.

En el capitulo 2 de generalidades, se describen las experiencias de algunas Plantas de cemento de Europa y Estados Unidos, que han aplicado el uso de estos combustibles demostrando la eficiencia de destrucción de elementos tóxicos en el horno sin generar otros contaminantes ni afectar la calidad del producto.

En el capitulo 3 se menciona el proceso de producción de cemento, además se describe el proceso de combustión en el horno de cemento y los principios de las mediciones de los gases de combustión para control de la operación del proceso.

En el capitulo 4, se examinan los criterios de selección de un residuo para considerarlo como combustible alterno en la fabricación de clinker.

En el capitulo 5, se analiza la generación de aceite lubricante usado en el Estado de Tabasco, este residuo fue seleccionado para la implementación de combustible alterno en la Planta Macuspana debido a la problemática ambiental que presenta en el Estado, por su poder calorífico, por cumplir con las

especificaciones que debe cubrir un combustible alterno, disponibilidad y por el permiso otorgado por las autoridades ambientales para disponer de combustibles alternos líquidos. Otro punto tratado en este capítulo es la estimación del costo de inversión y el payback del proyecto.

Para poder quemar este residuo es necesario contar con un permiso por parte de las autoridades ambientales (SEMARNAP-INE). Para obtener este permiso se tiene que entregar un documento llamado protocolo de pruebas de quemado donde se especifican todas las actividades a desarrollar durante las pruebas. En el caso de ser aprobado, las autoridades otorgan un permiso temporal para realizar pruebas de quemado en base al protocolo entregado, si al finalizar dichas pruebas se comprueba que la destrucción del residuo es total, (que no se genera una concentración mayor de elementos contaminantes que la generada por el uso del combustible convencional), se elabora un reporte final junto con un manifiesto de impacto ambiental con un estudio de riesgo y se entrega a las autoridades ambientales para obtener un permiso definitivo. Los pasos a seguir para el desarrollo del protocolo de pruebas de quemado se describen en el capítulo 6.

En el capítulo 7, se tiene un resumen de los resultados obtenidos durante las pruebas de quemado de residuos peligrosos líquidos en la Planta Ramos Arizpe, obteniendo resultados favorables para la quema definitiva de estos residuos en el horno de cemento. Las conclusiones de dichas pruebas se mencionan en el capítulo 8.

En el capítulo 9, se mencionan las bibliografías consultadas durante la realización de este trabajo.

Capitulo 2

Generalidades

2. Generalidades

El horno de cemento es una alternativa para la solución de la contaminación ambiental causada por la generación de residuos industriales, ya que muchas de las veces las industrias no tienen una disposición final adecuada para sus residuos. Tan solo en el Distrito Federal se generan 5,515 toneladas diarias de residuos industriales, que se tiran en drenajes, barrancas o predios y afectan a los mantos acuíferos.

De esta cantidad, el 53 % son líquidos o aguas de proceso con alto contenido de compuestos clasificados como peligrosos. Aunque la mayoría de los desechos son reciclables, esta técnica no parece ser común en las empresas, ya sea por falta de recursos o voluntad.

Los industriales interesados en disponer correctamente sus residuos peligrosos, se han topado con la enorme limitación de no tener en donde hacerlo, ya que sólo existen alrededor de 30 empresas autorizadas por parte del Instituto Nacional de Ecología (INE) para manejar residuos peligrosos. Estas empresas reciclan solventes sucios y aceites lubricantes usados y almacenan residuos temporalmente, pero no tienen la capacidad para atender a todos los industriales que lo demandan.

Los residuos peligrosos se clasifican en 14 categorías, entre las que destacan las provenientes de líquidos en proceso, los efluentes tratados y los residuos de proceso. El primer caso, que corresponde a líquidos o aguas de procesos, presenta un alto contenido de compuestos CRETIB, por su clasificación como Corrosivos, Reactivos, Explosivos, Tóxicos, Inflamables y Biológicos infecciosos. Los corrosivos son generados por 18 ramas industriales, principalmente en lo que corresponde a la de Químicos Básicos Inorgánicos (QBI), y se encuentran en líquidos o aguas de proceso.

Las sustancias reactivas se presentan en agua de residuos, lodos y residuos sólidos y son producidas por los QBI y 31 giro más.

En el caso de los desechos explosivos intervienen 14 ramas, como pintura, barnices, lacas, adhesivos e impermeabilizantes, y se localizan en aguas de proceso, lodos y residuos de proceso.

Los residuos tóxicos, los que más afectan al ser humano son desechados por 32 rubros industriales, entre ellos los QBI, y se van en aguas de proceso, y residuos sólidos.

Los *residuos inflamables* se generan por 29 ramas, incluidos los QBI, barnices y lacas, se presentan en las aguas de proceso, lodos, efluentes y residuos de proceso, no hay medición para los *biológicos infecciosos*.

Como se mencionó anteriormente los hornos cementeros son una alternativa para dar disposición final a una gran mayoría de los residuos catalogados como peligrosos ya sean líquidos o sólidos, sin generar otros residuos o emitir contaminantes a la atmósfera. para mas detalles en cuanto a los criterios de selección de combustibles alternos, ver el capítulo 4.

2.1. Antecedentes de los Materiales y Combustibles Alternos en la Industria del Cemento

A continuación se describirán las experiencias de algunas fabricas de cemento en Europa y Estados Unidos que han llevado a cabo programas de combustibles alternos demostrando ser una tecnología segura y limpia que permite destruir los residuos industriales sin crear problemas al medio ambiente.

En Europa se inició el uso de combustibles alternos en la década de los sesentas.

El primer uso documentado se dio en la década de los setentas, después de la crisis del petróleo en 1973.

En 1992 en los Estados Unidos, 25 de las 98 industrias cementeras utilizaban materiales residuales como combustible suplementario.

Uno de los combustibles usados con mucho éxito es la quema de llantas usadas, otro de los residuos comúnmente usado como combustible alterno en los hornos cementeros son los aceites lubricantes usados. Otra alternativa de uso de los residuos industriales en la fabricación de cemento es como materia prima alterna, como ejemplo se puede mencionar las arenas de desecho en una fabrica de piezas de automóviles al ser usadas en la fabricación de moldes de fundición, entre otros; óxidos de hierro, $\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$.

◆ **Combustibles alternos**

Uso de combustibles alternos en la Planta Whitehall

La planta Whitehall, en Pennsylvania hace funcionar dos hornos con precalentador en los cuales alimentan llantas completas a una tasa de 100 llantas por hora en un horno y 200 en el otro. Las llantas dan a la planta una tasa de reemplazo de combustible de casi el 30%. El sistema es totalmente automático y sólo necesita la mano de obra humana para transferir las llantas desde los trailers a los ganchos de la cadena transportadora de llantas.

Uso de combustibles alternos en la Planta Richmond

La Planta Richmond, en Columbia Británica, que tiene dos hornos de proceso húmedo, quema tiras de llantas de en la zona de combustión como sustitución de combustible, la tasa de sustitución es del 30%.

Las llantas se cortan en tiras menores de dos pulgadas sin quitar el trenzado de acero ni el reborde del alambre.

Uso de combustibles alternos en la Planta St. Constant

La Planta de St. Constant, en Montreal ha desarrollado y probado un inyector de medio-horno capaz de inyectar dos llantas por revolución dentro de sus dos hornos vía seca largos.

◆ **Materias primas alternas**

En la actualidad está aumentando el reemplazo de la materia prima de explotación de cantera con productos derivados industriales, siendo las barreras la disponibilidad de grandes fuentes de productos derivados adecuados y los costos de transporte. Los materiales obtenidos en pequeñas cantidades de varias fuentes aumentan la información analítica y el esfuerzo necesarios para asegurar una mezcla adecuada. La materia prima tiene un valor bajo unitario, por lo que los costos de transporte prueban ser excesivos.

Uso de materias primas alternas en la Planta Davenport

La Planta Lafarge de Davenport, en EE.UU, ha usado materia alterna desde 1988. La Planta de Lafarge usa óxido de hierro, incrustaciones de molino, escoria de hierro, ceniza fina procedente del carbón, cenizas de fondo, hidróxido de calcio y yeso como materia prima alterna.

Tiene un horno de vía seca con precalentador y usa cinco materiales alternos diferentes: productos de fundición, ceniza del carbón y ceniza de fondo, materiales contenedores de hierro, materiales que contienen hidrocarburos y catalizadores. La Planta ha mejorado los costos, reduciendo la compra de materia prima y la necesidad de explotar la piedra caliza en un 50%.

Uso de materias primas alternas en la Planta Alpena

La Planta Lafarge en Alpena, al Norte de Michigan, ha completado un cambio de materia prima que reduce el consumo de esquisto de explotación y combustible, ha reducido la generación de desechos, mejorado los costos y la calidad del producto.

Tiene cinco hornos de proceso seco y una capacidad de cemento de 2.5 millones de ton por año, la mayor de Norteamérica. La fuente de esquisto contiene el 5% de azufre y tiene gran cantidad de Kerógenos. El alto contenido de azufre causó 1200 ton por día de polvo de horno que había que eliminar y la emisión de 1300 ppm de SO₂ en los gases de escape del horno.

Para reducir el desecho de polvo, la planta localizó dos productos derivados industriales, la ceniza fina derivada de la combustión del carbón y las escorias de mineral de hierro, que combinadas, reemplazaron el esquisto. El reemplazo de esquisto requirió 230.000 toneladas al año de ceniza fina de carbón procedente de una instalación importante 130.000 t de escoria de mineral. El costo de la construcción y el manejo de los sistemas fue de 27 millones de dólares.

Capitulo 3

Proceso de producción del cemento



3. Proceso de Producción del Cemento

En la industria cementera cuando se tiene planeado establecer una planta, lo primero que se hace es la identificación de los yacimientos de Materias Primas los cuales deben estar lo más cerca del lugar donde quedaría establecida la Planta y que además las reservas de la Materia Prima garanticen por lo menos la operación por 50 años.

Para fabricar cemento pueden utilizarse tanto minerales de origen natural como productos industriales. Como materiales de partida, sirven sustancias minerales, que contienen los componentes principales del cemento: Cal, Sílice, Alúmina y Óxidos de Hierro. Estos componentes raramente se encuentran en las proporciones deseadas en una sola sustancia. Por lo tanto, la mayoría de las veces se ha de elegir la mezcla de un componente rico en cal (componente calcáreo) con otro pobre en cal pero que contiene más alúmina y óxidos de hierro (componente arcilloso). Estos dos componentes son por regla general, la Caliza y la Arcilla o la Caliza y la Marga.

La caliza se extrae por tronadas en los frentes de explotación, para lo cual se utilizan explosivos altos y bajos en una proporción de 20-80% respectivamente. Los frentes de explotación son de aproximadamente 12-14 metros de altura y 20-30 metros de ancho.

Los trabajos de explotación se basan en estudios por computadora los cuales determinan un modelo del depósito y para lo cual el programa se compone de tres partes principales:

a) Banco de datos de explotación, b) Informes sobre reservas y c) Optimización de programas de canteras.

En el curso normal de una evaluación del depósito, se comienza por el establecimiento del banco de datos de exploración.

Una vez que se tiene la estadística completa, el modelo se trata mediante el programa de la computadora y se extraen diversas informaciones tales como: Distribución de calidades, distribución de espesores y mapas de bloques (en estos bloques se tiene información sobre calidades y toneladas).

El siguiente paso es determinar las reservas de materias primas, para poder calcular las reservas realmente explotables, es preciso conocer la configuración definitiva de la cantera, la cual considera todo el material explotable desde el punto de vista técnico.

Una vez conocidas las reservas (calidad y cantidad), lo siguiente es la explotación del depósito de la mejor manera posible. En muchos casos, se trata de uno o más depósitos complejos y no homogéneos, depósitos que requieren planos de minas sofisticados si se trata de asegurar el tiempo de vida máxima posible. Esto es precisamente lo que se hace con el modelo por computadora que considerando los requisitos de las materias primas por un periodo prolongado de tiempo se elabora un programa que establece que bloque deberá explotarse en cada periodo de tiempo.

3.1. Descripción general del proceso

En las secciones siguientes se describe el proceso para la fabricación de cemento usado en la Planta Macuspana de Cementos APASCO.

La Planta Macuspana del Grupo APASCO produce básicamente tres tipos de cemento; cemento tipo IP, cemento tipo I y cemento clase H.

El proceso general para la producción de cemento, se encuentra seccionado por áreas, las cuales pueden ser en un momento dado independientes una de otra (ver Fig. 3.1). Las áreas desde extracción de materias primas hasta el envasado del producto son los siguientes:

- Extracción
- Trituración
- Molienda de Crudo
- Fabricación de Clinker
- Molienda de Cemento
- Envase y Despacho

A continuación se describirá el proceso por área.

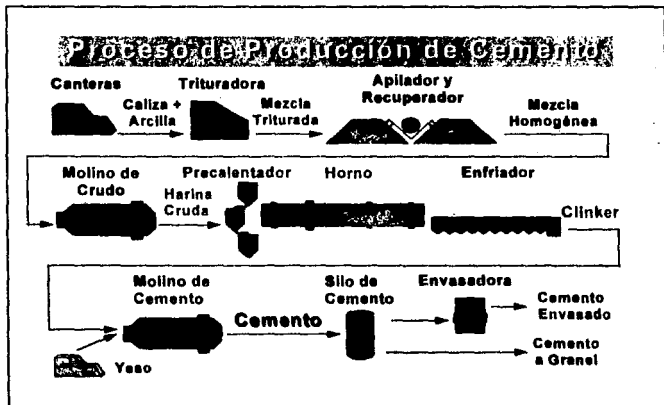


Fig. 3.1 Diagrama general

3.1.1. Extracción

Para la producción de cemento se utilizan dos materias primas principales; la Caliza y la Arcilla.

La planta cuenta con dos canteras de caliza y bancos de arcilla, la piedra caliza por su naturaleza es extraída de la cantera por explosivos para posteriormente alimentarla a la trituradora a un tamaño promedio de $1/2 \text{ m}^3$ junto con la arcilla.

La arcilla es un material más suave y con mayor humedad por lo cual se extrae con palas mecánicas y se combina con la caliza en una relación apróx. de 80 % caliza y 20 % arcilla, seguido, se alimentan juntas a la quebradora.

Tabla 3.1 Composición química característica de las materias primas principales

	CALIZA I	CALIZA II	ARCILLA GRIS	ARCILLA AMARILLA
Pig.	36.88	42.30	16.40	12.31
SiO ₂	10.93	2.50	48.90	51.50
Al ₂ O ₃	2.34	0.93	13.40	14.80
Fe ₂ O ₃	1.28	0.46	7.40	8.10
CaO	42.87	52.08	7.90	7.30
MgO	2.77	0.99	2.80	1.80
SO ₃	1.54	0.45	1.31	0.11
K ₂ O	0.34	0.08	1.35	1.14
Na ₂ O	0.18	0.03	0.26	0.17
SC	166.60	828.80	5.00	4.40
MS	3.09	1.95	2.35	2.25
MA	1.93	2.04	1.81	1.83
% Tit.	80.80	94.80	13.80	11.40
% Hum.	2.90	2.80	22.10	29.00

3.1.2. Trituración

El área de trituración cuenta con los grupos (Trituración, Transporte y Prehomogeneización) y (Torre de Muestreo).

El material extraído de la cantera y la arcilla son transportados por camiones hasta la trituradora, la trituradora es de impacto con doble rotor (primario y secundario) con una capacidad de 800 ton/hr, el material que sale de la trituradora con un tamaño no mayor de 1 pulg.(máx. 5% de retenido en la malla de 11/2 pulg.), es transportado por un grupo de bandas hasta el patio de prehomogeneización donde se apila el material de una manera longitudinal con una estructura a dos aguas (método Chevrón) por medio de una pluma (apilador) que se mueve a lo largo del lecho, procurando mantener una velocidad constante para mantener un espesor deseado. En este método es importante mantener un tamaño de partículas granulométricamente iguales (aprox.) para evitar producir segregaciones, es decir que las gravas gruesas rueden hacia abajo. (ver Fig. 3.2)

Para un mejor control en la formación de las pilas se cuenta con una torre de muestreo, en esta sección se lleva a cabo la preparación de las muestras partiendo de un muestreo dinámico. Conforme se va formando la pila se toman muestras aleatorias hasta completar 500 ton. (durante la formación de la pila). De la torre de muestreo se toma una muestra representativa y se lleva al laboratorio para su análisis, de los resultados obtenidos se corrige la pila hasta obtener en el promedio ponderal los parámetros de control previamente establecidos.

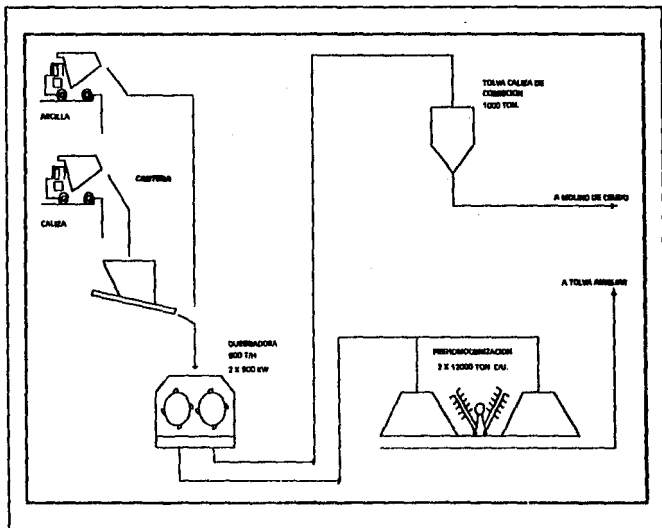


Fig. 3.2 Diagrama de Flujo de Cantera

3.1.3. Molienda de Crudo

La mezcla de caliza y arcilla es recuperada del patio de prehomogeneización y alimentada al molino de crudo, donde el material es secado y molido por medio de bolas de acero especial hasta obtener un tamaño de partícula ya determinado (aprox. M-212 \rightarrow 3.5 %, M-90 \rightarrow 17.0 %) con ayuda de un separador y dos ciclones manteniendo un circuito cerrado. La harina cruda es analizada cada hora, si el análisis indica que el crudo se encuentra fuera de parámetros, el material se corrige inmediatamente antes de la alimentación al molino con arena o caliza según se requiera, o en el caso del crudo tipo V se corrige con mineral de hierro y arena (ver Tabla 3.2).

La producción del molino de crudo es de 210 ton/hr, con un grado de llenado del 24 % (carga de bolas), 9.25 mts de largo, 5.2 mts de diámetro y una velocidad de 13.5 r.p.m. (ver Fig. 3.3).

Se cuenta con dos silos para almacenar la harina cruda con capacidad de 6,000 ton cada uno, contando estos con un sistema de homogeneización.

Tabla 3.2 Composición química característica de la harina cruda

	CDO TI	CDO TV	MATERIALES CORRECTIVOS			
			ARENA JALTIPAN	ARENA CALIXTO	CALIZA	MINERAL DE HIERRO
Pig.	13.60	35.50	0.52	3.90	42.04	-
SiO ₂	13.30	13.80	95.60	73.40	2.70	0.11
Al ₂ O ₃	3.80	2.40	0.30	12.90	0.81	0.00
Fe ₂ O ₃	2.00	2.90	1.00	3.50	0.37	99.50
CaO	41.40	42.60	0.48	1.20	51.00	0.40
MgO	1.90	1.20	0.00	0.08	1.50	0.77
SO ₃	1.08	0.56	0.06	0.18	0.54	0.06
K ₂ O	0.41	0.21	0.00	2.70	0.11	0.00
Na ₂ O	0.19	0.08	0.00	2.0	0.03	0.19
SC	98.10	98.30	0.20	0.50	582.70	0.60
MS	2.29	2.62	71.88	4.48	2.29	0.00
MA	1.91	0.82	0.33	3.69	2.19	0.00
% Tit.	75.60	77.20	-	-	94.40	-
% Hum.	1.00	0.73	6.21	16.40	0.96	6.10

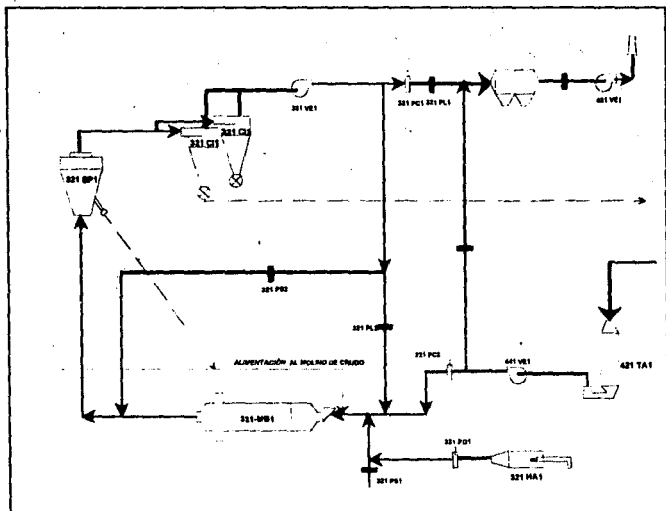


Fig. 3.3 Diagrama de Flujo del Molino de Crudo

3.1.4. Fabricación de Clinker

La harina cruda almacenada en los silos es recuperada y alimentada al precalentador el cual cuenta con cuatro etapas con un precalcinador.

El material crudo es alimentado en la parte superior del precalentador, a la salida de los gases del ciclón II y transportado por arrastre al ciclón I (ver Fig 3.4), iniciándose de esta manera la transferencia de calor y preparación del material para su alimentación al horno, el cual es un horno rotatorio con una inclinación de 4° , con una longitud de 58 mts y un diámetro interno de 4.15 mts (coraza sin refractario), para la protección de la coraza y mantener un sistema térmico aislado la coraza se encuentra revestida con ladrillo refractario con un diámetro de 8 pulg., el horno gira lentamente a una velocidad de 2.95 r.p.m. (aprox.). Después de pasar el material por la última etapa entra por la cuchara del horno a una temperatura aprox. de 900°C para posteriormente continuar dentro del horno pasando por las etapas de calcinación, transición y sinterización, alcanzándose en esta última etapa temperaturas alrededor de $1,450^\circ\text{C}$ y así transformarse finalmente en clinker.

La producción promedio del horno es de 2,680 ton/d, como combustible para generar energía térmica y llevar a cabo las reacciones de combinación de los óxidos dentro del horno se utiliza gas natural con un consumo promedio diario en condiciones normales de $254,000\text{ m}^3$

Dentro del horno se llevan a cabo las siguientes reacciones:

- A) La arcilla se deshidrata y pasa a metacaolín, a unos 900°C . Las combinaciones de hierro usualmente presentes en las arcillas quedan en forma de óxidos.
- B) La caliza se disocia en CaO y CO_2 , también a unos 900°C .

Usualmente la descarbonatación deberá estar en un grado de avance antes de entrar al horno, lo que se logra con el precalentador y precalcinador.

La descarbonatación es endotérmica y requiere de una considerable cantidad de calor para completarse, requiriendo de aproximadamente de 490 Kcal. por Kg. de clinker producido.

La reacción de descarbonatación es de gran importancia en todos los sistemas de hornos de clinker teniendo gran influencia tanto en la estabilidad de la operación como en la productividad del sistema.

C) Posterior a la etapa de descarbonatación, el material llega a la etapa de sinterización donde se forma una fase líquida alcanzándose una temperatura de aproximadamente 1450 °C, en esta sección se llevan a cabo las reacciones de composición, de la siguiente manera:

a) Cada mol de óxido de hierro (se considera como Fe_2O_3) toma otro mol de Al_2O_3 y 4 moles de CaO para dar $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{CaO}$, (C4AF) aluminoferrito tetracálcico.

b1) Si la proporción molar $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}_3$ es superior a la unidad (que es lo frecuente), la alúmina sobrante se combina en la relación 1:3 con CaO para dar $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaO}$, (C3A) aluminato tricálcico.

b2) Si la proporción molar $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}_3$ es menor de uno, el Fe_2O_3 sobrante toma dos moles de CaO para dar $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{CaO}$, (C2F) ferrito dicálcico.

c) Una vez cubierta la saturación de cal de los óxidos de hierro y de alúmina, el SiO_2 toma la cal necesaria para formar $\text{SiO}_2 \cdot 2\text{CaO}$, (C2S) silicato dicálcico.

d) La cal restante se combina con el $\text{SiO}_2 \cdot 2\text{CaO}$ para dar $\text{SiO}_2 \cdot 3\text{CaO}$, (C3S) silicato tricálcico. Si sobra cal queda como cal libre CaO; si falta, más o menos se forman proporciones menores o mayores de ambos silicatos dicálcico y tricálcico.

En base a las reacciones analizadas anteriormente, endotérmica (descarbonatación) y exotérmica (fase líquida), el calor neto requerido para producir 1.0 Kg. de clinker, es de alrededor de 900 Kcal/Kg. o más, dependiendo de la tecnología instalada.

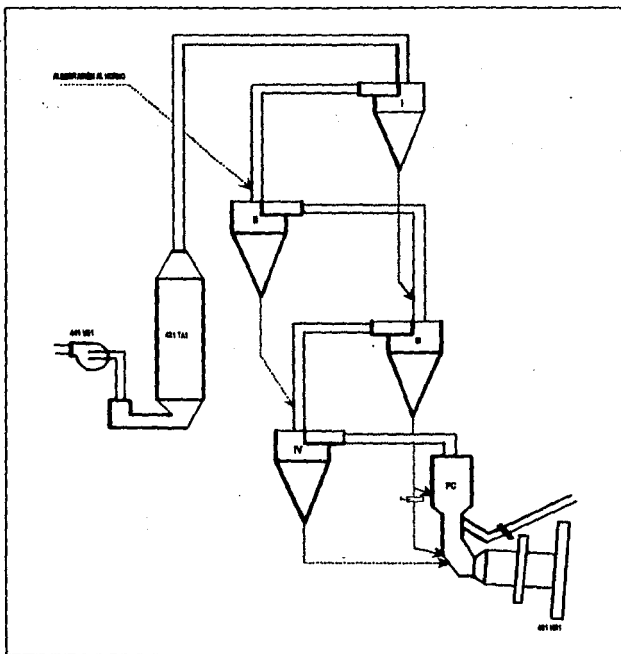


Fig. 3.4 Flujo de Gas en el Precalentador

Los constituyentes normales y principales del clinker son:

- Silicato tricálcico, $\text{SiO}_2 \cdot 3\text{CaO}$ (C3S)
- Silicato dicálcico, $\text{SiO}_2 \cdot 2\text{CaO}$ (C2S)
- Aluminoferrito tetracálcico, $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{CaO}$ (C4AF)
- Aluminato tricálcico, $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaO}$ (C3A)
- Ferrito dicálcico, $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{CaO}$, (C2F).

El clinker producido es enfriado por medio de aire en un enfriador de parrillas, el aire caliente obtenido es aprovechado como aire secundario para el horno y aire terciario para el precalcinador (ver Fig. 3.5), el clinker "frio" es transportado por cangilones a los silos de clinker que son dos con una capacidad de 15,000 ton cada uno, aquí se almacena para su posterior molienda en el área del molino de cemento.

Tabla 3.3 Composición química característica del clinker

	CLINKER TIPO	
	I	V
Pig.	0.40	0.30
SiO_2	20.70	21.70
Al_2O_3	5.90	3.90
Fe_2O_3	3.10	4.50
CaO	63.90	65.40
MgO	2.90	1.90
SO_3	1.03	0.56
K_2O	0.63	0.43
Na_2O	0.51	0.22
SC	95.50	95.80
MS	2.31	2.62
MA	1.90	0.87
C3S	55.50	66.50
C2S	17.60	12.20
C3A	10.30	2.70
C4AF	9.50	13.50
P.Vol.	1247	1175
Cal Libre	0.80	0.56

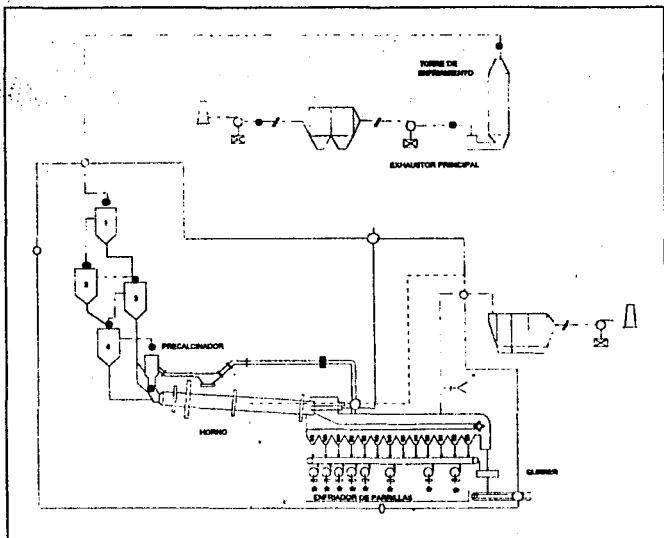


Fig. 3.5 Diagrama de Flujo del Horno

3.1.5. Molienda de Cemento

El clinker es recuperado de los silos y molido en un molino de bolas junto con yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) esto es con el fin de evitar el fraguado rápido producido por el C3A. El C3A (aluminato tricálcico) tiene una alta rapidez de hidratación, esto hace que el cemento fragüe en seguida, antes de usarse en la obra. El retraso del fraguado por el yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) se debe a que en el agua de amasado no puede precipitar el C3A hidratado y trabarse sus cristales, con pérdida de la plasticidad de la pasta (fraguado), porque existiendo disuelto también CaSO_4 lo que cristaliza es una sal doble $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaO} \cdot \text{SO}_4 \cdot 11\text{H}_2\text{O}$ o $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaO} \cdot 3\text{SO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$.

Para la adición de yeso, se determina en el laboratorio el porcentaje de azufre, dependiendo del valor obtenido se agrega o quita yeso al cemento.

La cantidad de yeso es proporcional a la concentración del C3A. Normalmente se le adiciona al rededor de 4 % de yeso al cemento.

Los tipos de cemento que se producen en la Planta Macuspana son los siguientes; cemento. tipo IP, cemento. tipo I y cemento. clase H. (ver Tabla. 3.5).

El molino de cemento es un molino de bolas con dos cámaras de molienda, separadas por un diafragma intermedio, la primer cámara cuenta con bolas de mayor tamaño, en esta sección se realiza la molienda de las partículas más gruesas y en la segunda cámara se muelen las partículas más finas que pasaron por arrastre de aire por el diafragma intermedio. La molienda se hace en un sistema cerrado molino-separador-molino, ajustando la finura del cemento con movimientos de operación del separador. (ver Fig. 3.6).

Debido a las diferentes propiedades físicas de los tipos de cemento que se producen, la producción del molino es variable. (ver Tabla. 3.4).

Tabla 3.4 Proporcionamiento de materiales en los tipos de cemento

PROPORCIONAMIENTO DE LOS MATERIALES						
	Prod. (ton/hr)	Clinker Tipo I (%)	Clinker Tipo V (%)	Yeso (%)	Puzolana (%)	Caliza (%)
CTO TIPO IP	121	75.5	*	4.5	20.0	*
CTO TIPO I	143	92.0	*	4.0	*	4.0
CTO CLASE H	156	*	95.5	4.5	*	*

Tabla 3.5 Composición química característica de los diferentes tipos de cemento.

	CTO TIPO IP	CTO TIPO I	CTO CLASE H
Pig.	4.50	2.98	1.35
SiO ₂	26.00	19.85	21.05
Al ₂ O ₃	6.20	5.51	3.75
Fe ₂ O ₃	3.10	2.99	4.25
CaO	53.30	62.14	64.40
MgO	2.40	2.74	1.95
SO ₃	2.80	2.36	2.45
K ₂ O	0.84	0.60	0.36
Na ₂ O	0.73	0.52	0.25
Res.Ins.	13.30	1.18	0.38
Cal Libre	0.74	0.79	0.46
Blaine	4702	3569	2955
Ret. M-75	1.93	3.46	6.80
Ret. M-45 _μ	12.10	16.49	23.30

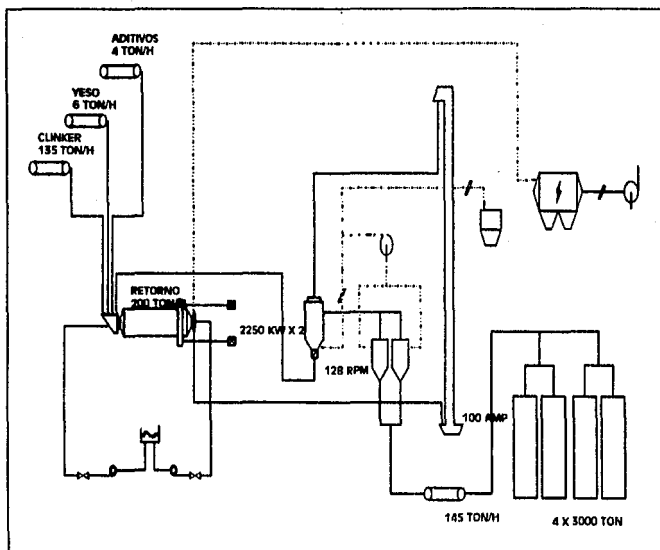


Fig. 3.6 Diagrama de Flujo del Molino de Cemento

3.1.6. Envase y Despacho

El cemento de acuerdo a requerimientos del cliente es recuperado de los silos y es despachado de acuerdo a ventas en furgones de ferrocarril o camiones, en sacos o granel.

El envase cuenta con dos líneas para despacho a granel (tolvas camiones y tolvas ferrocarril), al igual que dos líneas para despacho en sacos de 50 kg cada uno. La velocidad de las envasadoras es de 40 sacos por minuto, lo que hace 2400 sacos por hora, esto equivale a 120 ton/hr de cemento despachado en camiones y furgones.

En el área de despacho en sacos-camión, se utilizan dos equipos para carga automática en camiones llamados Caricamat, una línea para carga normal en camiones y dos líneas para carga de sacos en ferrocarril.

3.2. El Horno Cementero

En la fabricación de cemento, uno de los puntos más importantes es el proceso de producción de clinker, lo cual se lleva a cabo en el horno rotatorio. Para poder efectuar las diferentes reacciones químicas que se efectúan en ese equipo, es necesario adicionar energía calorífica la cual se obtiene al quemar combustibles ya sean sólidos, líquidos o gas natural a contra corriente en dicho horno y por lo tanto se requiere desde el punto de vista del proceso el tener un control total sobre la combustión, esto lleva a realizar un análisis de gases de salida que indique como se está realizando el proceso de combustión dentro del horno, así como también lograr la optimización del mismo.

En esta sección se describirá el proceso de combustión en el horno de cemento y los principios de las mediciones de los gases de combustión para control de la operación del proceso.

3.2.1. La Combustión

La fabricación del clinker es un proceso de alta temperatura, de calentamiento directo, es decir los gases de combustión entran en contacto con los materiales procesados, por consiguiente en su recorrido por el sistema de sinterizado, precalcinado y precalentado existe la interacción e influencia entre ambos.

El combustible tradicional utilizado es el gas natural cuyos componentes principales son:

- Carbón
- Hidrógeno
- Azufre
- Nitrógeno
- Cenizas

Los productos principales de la combustión son:

- Bióxido de carbono
- Agua
- Bióxido de azufre

Debido a que los componentes del combustible están enlazados, formando una mezcla compleja de hidrocarburos pesados de diferente estructura molecular, ya que la combustión generalmente no se completa al 100% en ningún proceso de combustión, quedan siempre productos intermedios generados por el "cracking" de los hidrocarburos complejos; de tal manera que la gama de productos de la combustión, considerando las trazas que se presentan de tales productos intermedios, es muy grande y puede incluir entre muchos otros:

- Radicales metilo
- Aldehidos
- Radicales OH.
- Radicales H.
- Monóxido de carbono
- Carboxilos
- Carbono
- Radicales O-, N-, etc.

Por otro lado, el nitrógeno del aire en presencia de oxígeno y alta temperatura reacciona para formar los óxidos de nitrógeno.

Además del intercambio de calor en la interacción entre los materiales de proceso y los gases de combustión, se llevan a cabo reacciones internas en el horno principalmente entre los óxidos de azufre y bióxido de carbono, como sigue:

Los óxidos de azufre de los gases de combustión reaccionan con algunos componentes del clinker, integrándose al mismo como sulfitos y sulfatos:

El bióxido de carbono, producto de la descarbonatación se integra a los gases de combustión y sale del sistema vía chimenea.

Otra interacción es entre las partículas, parte de los productos y materias primas se integra en la corriente gaseosa saliendo del sistema por la chimenea y parte de las partículas generadas por la combustión se integran al clinker (cenizas, metales, etc). En las industrias cementeras este problema se elimina en gran parte con la integración de equipos recuperadores de partículas, por ejemplo; electrofiltros o casas de bolsas.

Los productos intermedios de la combustión se inhiben mediante el control de la combustión a través del monitoreo de CO y NOx en diversos puntos del proceso y manteniendo el aire, gases y perfil de temperaturas balanceados automáticamente con el sistema de control experto y distribuido de la planta.

➤ **El Proceso de Combustión**

Los tres factores físicos que participan en una combustión en un horno de cemento son:

- La turbulencia
- La temperatura
- El tiempo de residencia

Otro factor importante de la combustión es la presencia de comburente necesario para la oxidación del combustible en una relación y mezcla íntima adecuada.

Los tres componentes mayores en un sistema de combustión son:

- Combustible,
- Oxidante o comburente
- Diluyente

En el caso de los hornos de clinker, el óxido de carbono, producto de la descarbonatación es un diluyente importante de los gases de combustión.

Los factores de turbulencia, temperatura, tiempo de residencia y exceso de comburente en el sistema son fundamentales para obtener una combustión lo más completa posible.

En el horno cementero los gases de combustión tienen un tiempo de residencia de más de 3.5 seg. a una temperatura igual o superior a 1450 °C, (ver Fig. 3.7).

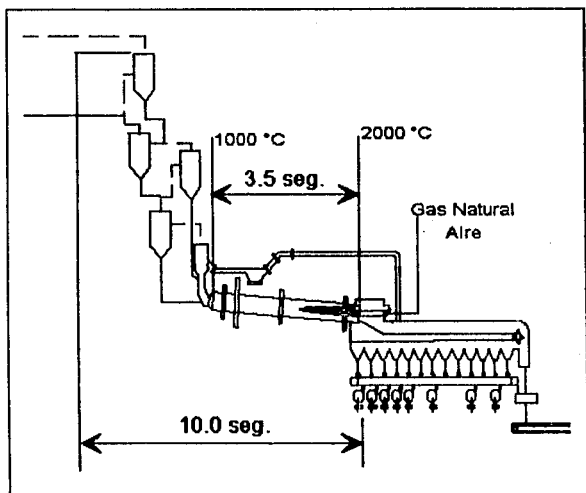


Fig. 3.7 Tiempo de residencia de los gases de combustión en el horno

> La Incineración

La incineración es un proceso de combustión abocado a la destrucción térmica de materiales indeseables y en consecuencia los principios básicos que rigen el quemado de combustibles tradicionales son también aplicables.

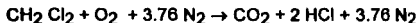
Investigaciones de la EPA y la experiencia de operación de la industria indica que la incineración, comparada con otras tecnologías alternativas tiene el mayor grado de destrucción y control para mayor rango de desechos.

Cuando los desechos a incinerar, contienen energía potencial aprovechable como calor y se utilizan en sustitución de combustibles convencionales en proceso de producción de bienes o servicios, se convierten en una fuente alternativa de energía por lo que se les conoce como "combustibles alternos" o "suplementarios"

La incineración generalmente involucra tres modos simultáneos de reacción química:

- Oxidación Fuerte.

La oxidación de residuos se ilustra con el siguiente ejemplo donde el diclorometano es oxidado para producir productos inofensivos o controlables.



- Pirólisis

La pirólisis es un proceso de degradación térmica, en donde el material orgánico es destruido o químicamente rearrreglado en ausencia o cerca de la ausencia de O_2 o aire. Usa calor para romper las ligaduras de los elementos contenidos en un compuesto.

Por otro lado, la incineración requiere alrededor de 2 - 3% de exceso de aire para asegurar suficiente Oxígeno en la cámara de combustión para que haya contacto efectivo con el residuo.

Los compuestos degradados generalmente producirían compuestos más simples como CO, CH₄ y H₂O, los cuales están en la fase gaseosa y el carbón (C) y cenizas, los cuales pueden estar en la fase sólida, líquida, ser arrastrados parcialmente en la gaseosa.

• Ataque de Radicales

Durante la incineración, las flamas se caracterizan por temperaturas comúnmente en la cercanía de 2000° C y un flujo de gas rico en radicales. Este flujo consiste primeramente de hidrógeno atómico (H), oxígeno atómico (O), cloro atómico (Cl), radicales hidroxilo (OH), posiblemente radicales metilo (CH₃), sistemas de C - H - O y radicales cloroxilo (ClO·) provenientes de los compuestos del residuo y facilitan la descomposición del mismo.

Aunque su formación es en la flama, su generación sigue más allá, mientras prevalezca temperatura lo suficientemente alta.

➤ Incineración completa

El objetivo de la incineración de residuos es convertir los materiales indeseables en productos de combustión inofensivos, de forma que puedan ser emitidos sin dañar el ambiente. Cuando un residuo es completamente incinerado, se asume generalmente que los elementos del desecho siguen los patrones de reacción mostrados en la tabla 3.6.

Tabla 3.6 Productos de incineración completa

ELEMENTO DEL RESIDUO	CONVERSIÓN	PRODUCTOS
H	→	H ₂ O
C	→	CO ₂
Cl	→	HCl o Cl ₂
F	→	HF o F ₂
S	→	SO ₂
Metales Alcalinos		HIDRÓXIDOS
Na	→	NaOH
K	→	KOH
Metales no Alcalinos		ÓXIDOS
Cu	→	CuO
Fe	→	Fe ₂ O ₃

En la práctica se forman trazas de productos parcialmente oxidados de la combustión incompleta. Esos compuestos incluyen CO, partículas y una gama de compuestos orgánicos. No obstante estos procesos son capaces de alcanzar el 99.99 % de eficiencia de destrucción de residuos o mayor (hasta 99.9999 % para residuos de muy difícil destrucción y alta peligrosidad).

3.2.2. Emisión de Partículas y Gases de Combustión

Durante la producción de clinker debido al proceso mismo, se emiten partículas y gases de combustión que son emitidos por la chimenea principal del horno. Para contrarrestar estas emisiones se implementan medidas de control ambiental, en el caso de partículas se instalan equipos anticontaminantes como pueden ser filtros electrostáticos o casas de bolsas, en la chimenea principal se instalan equipos cualitativos llamados opacímetros para tener una referencia en la emisiones de partículas, para el control de los gases de combustión, básicamente se basa en la selección de los combustibles y la optimización de la operación del proceso de combustión, para esto se instalan sistemas de monitoreo continuo en secciones de mayor representatividad como puede ser en la entrada al horno y en la salida del precalentador.

En el caso de quemar otro tipo de combustible no convencional, por ejemplo, aceites usados o en general residuos industriales considerados por las autoridades ambientales como residuos peligrosos, se requiere la instalación de un equipo de monitoreo continuo instalado en la chimenea principal del horno. Este equipo a diferencia del monitoreo continuo durante el proceso, es para controlar las emisiones de gases a la atmósfera de acuerdo a las especificaciones de las normas ambientales y el otro se ocupa para el control del proceso de combustión en el horno.

A continuación se hará una descripción de las razones de medición de concentraciones de los gases de combustión generados en la producción de clinker, para el control de la operación del horno y para poder evaluar el grado de contaminación del aire.

CO

El objetivo para que se de una medición continua de CO, en el proceso de producción de clinker, es para tener el control mismo de la combustión y en el caso de despolvamientos con electrofiltros, protegerlo contra explosiones, en estos casos el proceso mismo obliga desaparecer concentraciones de CO, por otro lado, una concentración de CO es una energía no aprovechada. Cuando el CO se encuentra en el ambiente del horno provoca la volatilización del azufre que puede venir del combustóleo, (generalmente el Gas Natural usado como combustible presenta baja concentración de azufre), y esto genera problema de

obstrucciones en los ductos en la zona del precalentador y en el horno mismo debido a la condensación del azufre.

Debido a esto no es conveniente tener CO en el proceso, tanto para evitar problema de operación como para incorporar el azufre en el clinker como sulfatos. Ya que los hornos de cemento se comportan como equipos de sulfuración.

NO

El monóxido de nitrógeno (NO), se origina en la combustión de combustibles fósiles por la oxidación parcial del nitrógeno molecular del aire de combustión (NO térmico), y del nitrógeno orgánicamente ligado en el combustible (NO del combustible). Durante un tiempo de permanencia más largo de los gases dentro de un margen de temperatura inferior a 1200 °C el monóxido de nitrógeno (NO) se oxida y forma el dióxido de nitrógeno (NO₂) substancialmente más tóxico. Ambos óxidos de nitrógeno se designan de manera resumida por NO_x

La concentración de este gas es un parámetro de la operación del horno, su concentración dice el nivel de calor que existe en el horno, el cual es importante por dos sentidos. El primero, si el nivel de calor es bajo, proporcional a la concentración de NO, el producto de salida del horno "clinker", no tendrá la suficiente calidad para constituir el cemento que demanda el mercado y el segundo sentido es, que si el nivel de calor es alto, esto provocará el deterioro del refractario con el cual está cubierto el sistema, provocando paro del horno para su reparación, con sus consecuencias de altos costos.

Por estas razones básicas las concentraciones de NO, se incluye como parámetro de control incorporado a los actuales "sistemas expertos de control automáticos", quienes ayudan en la operación del horno a reducir consumos térmicos de energías y como consecuencia disminución de contaminantes a la atmósfera.

SO₂

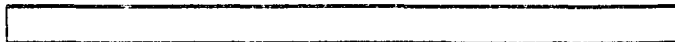
Este gas normalmente no se usa como una medición continua durante el proceso, la razón es mencionada en la sección del CO, debido a que la cantidad de azufre adicionada al proceso en lugar de oxidarse para formar SO₂, este sale del sistema incorporándose en el clinker en forma de sulfatos.

O₂

Para que se pueda llevar a cabo la combustión de un combustible se requiere necesariamente la presencia de oxígeno, este gas se obtiene del aire.

Para realizar una combustión completa, se necesita una cantidad mínima teórica de oxígeno, la cual depende del tipo de combustible, prácticamente, una combustión requiere algo más de aire que el mínimo teórico, a fin de evitar ausencia local de O₂ y producto sin quemar.

Capítulo 4
Criterio de selección de combustibles
alternos y su legislación ambiental



4. Criterios de Selección de Combustibles Alternos y su Legislación Ambiental

4.1. Los Combustibles Alternos

Un combustible alternativo es aquel que tiene un valor energético y que puede sustituir en parte o totalmente a un combustible convencional. Al quemar este combustible se cumple con la producción del clinker sin afectar su calidad y a su vez con la destrucción de materiales residuales indeseables con poder calorífico aprovechable, ya que estos generalmente presentan un problema de contaminación ambiental.

Adicionalmente a lo anterior el uso de combustibles alternos presenta las siguientes ventajas:

a) **El valor energético de los materiales es recuperado.** Las propiedades especiales del horno de cemento hacen posible recuperar constructivamente y a bajo costo el contenido energético de muchos residuos orgánicos.

Eliminar estos materiales del ambiente disminuye la amenaza potencial a la salud pública y de la seguridad de la comunidad.

b) **Los recursos naturales no renovables son conservados.** Una ventaja significativa del uso de combustibles alternos en los hornos de cemento es la conservación de los combustibles fósiles no renovables, como el petróleo, el gas y de otros combustibles como el carbón.

c) **Se reducen los costos de la manufactura del cemento.** La producción de cemento es un proceso de uso intensivo de energía. El costo de la energía es de aproximadamente 25% de los costos de producción. En consecuencia, tales costos son fuertemente influenciados por los precios del petróleo.

d) Se utilizan la tecnología e instalaciones existentes. El mundo se encuentra frente a una crisis de disposición y control de residuos. La tasa a la que se producen residuos excede con mucho a la capacidad para su tratamiento y eliminación de forma que impida el riesgo futuro. Desafortunadamente, el diseño y construcción de nuevas instalaciones de tratamiento y eliminación son un proceso extremadamente costoso y de largo plazo. Una de las ventajas del uso de hornos de cemento es que la tecnología e instalaciones ya están allí. Además, el uso de una planta existente, contra la construcción de nuevas instalaciones no da como resultado una nueva fuente de emisiones.

e) No se generan nuevos residuos. A diferencia de los incineradores que deben utilizar materiales alcalinos, como cal, para neutralizar la acidez de los gases generados a partir del quemado de algunos residuos, lo que genera lodos residuales que hay que disponer, los hornos de cemento no lo requieren pues la piedra caliza es el principal ingrediente para la manufactura de clinker y proporciona un excelente medio para neutralizar la acidez de los gases en el propio del horno, y es parte integral del producto, las cenizas se incorporan también como parte del clinker del cemento.

La opción de los hornos de cemento para la eliminación de residuos no promueve la generación de nuevos residuos. Por el contrario, es más bien una forma efectiva de eliminación de tales materiales indeseables.

Esto hace que el horno de clinker sea un proceso intrínsecamente seguro para la destrucción de materiales residuales puesto que autocontrola las emisiones a la atmósfera sin producir otro residuo que tenga que disponerse de otra forma. A nivel mundial ha sido una tecnología utilizada con éxito, por ejemplo; Laegerdorf (Francia), Gmuenden (Austria), Untervatz (Suiza), Reuchnet (Suiza). A nivel nacional se ha implementado en Plantas de APASCO, Cemento Cruz Azul y en CEMEX con excelentes resultados.

Por otro lado el clinker obtenido no es afectado en sus propiedades cementantes ni estructurales.

Las eficiencias de destrucción y remoción de contaminantes varían desde el 70 al 99% para los metales y cloruros y del 99.99% y mayor para la destrucción de compuestos orgánicos peligrosos.

Algunos materiales residuales que son apropiados para reciclarse en hornos de cemento se encuentran regularmente en los productos de consumo ordinario, como: lacas para muebles, materiales refinados, productos de limpieza caseros y acetona. El aceite usado de motor, plásticos, llantas y la basura municipal también tienen un excelente potencial para ser reciclados como combustible alternos para los hornos de cemento.

La industria es otra fuente de residuos líquidos y sólidos reciclables. Frecuentemente existe un significativo contenido de energía en residuos de pinturas para automóviles, aceite usado de motores de combustión, subproductos petroquímicos y residuos de varias tintas, colorantes y polímeros. La manufactura de adhesivos, revestimientos farmacéuticos, y productos de refinería también generan residuos que pueden ser tomados como recursos energéticos por los productores de cemento. Los residuos lodosos y pesados también son apropiados para reciclarse en un horno de cemento cuando se combinan con otras formas de residuos orgánicos.

Existen muchos residuos que pueden utilizarse como combustibles alternos, en el proceso de producción de cemento, que pueden provenir de industrias tales como:

- Automotriz
- Química
- Pintura
- Plástico
- Petroquímica
- Farmacéutica
- Electrónica
- Otras

Los combustibles alternos son comúnmente mezclas de materiales orgánicos, los cuales pueden contener metales y óxidos de metales de los procesos que generan los residuos, pueden ser líquidos, pastosos o sólidos.

La siguiente es una lista de los constituyentes típicos que contienen los combustibles alternos, en su mayoría provenientes de la industria.

Lista de Constituyentes de Combustibles Alternos

Solventes Clorados

1,1,1-Tricloroetano
Tricloroetileno
Tetracloroetileno
Cloruro de Metileno
Tetracloruro de Carbono

Alcoholes

Alcohol Metílico
Alcohol Etilico
Alcohol n-Propílico
Alcohol Isopropílico
Alcohol n-Butílico

Cetonas

Metil Etil Cetona
Metil Isobutil Cetona
Acetona
Ciclopentanona

Aldéhdos

Formaldehído
Butiraldehído
Acetaldehído

Sólidos

Liantas
Pañal
Plásticos
Otros

Derivados del petróleo

Diesel
Aceites Hidráulicos
Otros Aceites

Acetatos

Acetato Etilico
Acetato Metílico
Acetato Butílico
Acetato Vinílico

Compuestos Aromáticos

Benceno
Tolueno
Xileno
Naftaleno
Fenol

Compuestos Alifáticos

Hexáno
Heptano
Pentano

Ácidos Grasos

4.2. Selección de los Combustibles Alternos

Los combustibles alternos por su origen, pueden ser líquidos, sólidos o pastosos, poseer características físicas y químicas variadas, sin embargo, esto no impide que se establezca especificaciones límites para cumplir así como los objetivos de la fabricación de Clinker.

4.2.1. Caracterización de los combustible alternos

A continuación se muestran los límites de los parámetros a controlar en la alimentación de combustibles alternos al horno cementero.

Estas condiciones deben cumplirse ya que están en función del permiso otorgado por las autoridades ambientales para la quema de estos residuos y a las condiciones del proceso.

En la tabla 4.1 se indica una caracterización típica que debe cumplir un combustible alterno.

Estos límites para la alimentación son función de los límites de emisión determinados mediante el análisis de riesgos a la salud, del máximo valor de sustitución y de la eficiencia de remoción y destrucción del sistema.

Tabla 4.1 Características típicas que debe cumplir un residuo para ser usado como combustible alterno en un horno de cemento.

Metales	Límites
Antimonio	200 ppm
Arsénico	100 ppm
Bario	6,000 ppm
Berilio	5 ppm
Cadmio	175 ppm
Cromo	500 ppm

... Continuación Tabla 4.1

Mercurio	50 ppm
Níquel	100 ppm
Plata	100 ppm
Plomo	4,000 ppm
Selenio	100 ppm
Talio	100 ppm
Vanadio	1,000 ppm
Zinc	1,500 ppm

Características Químicas	Límites
Cloro	10,000 ppm
PCB's	<10 ppm
Azufre	40,000 ppm

Características físicas	Límites
Cenizas	<10 %
Poder calorífico	>5,000 Kcal/Kg
Humedad	<12 %
Densidad	>0.85 < 1.1 Kg/lt.
Sólidos Suspendedos	<20 %
pH	de 4 a 11
Viscosidad	<200 CP a 22°C

4.2.2. Residuos no apropiados para usarse como combustible alternativo

Los residuos que no deberán formar parte de las mezclas para formular combustibles alternos son:

- ☒ Residuos que sufran cambios violentos, que reaccionen violentamente con agua, que formen mezclas explosivas con agua o que sean capaces de tener una reacción de detonación y explosiva bajo condiciones de manejo normales (25°C y 1 atm.).
- ☒ Dioxinas policloradas.
- ☒ Dibenzofuranos policlorados
- ☒ Bifenilos policlorados en concentraciones mayores a 50 mg/ft
- ☒ Plaguicidas concentrados
- ☒ Desechos radiactivos
- ☒ Gases Comprimidos
- ☒ Compuestos biológicos patológicos
- ☒ Compuestos hexaclorados tales como: hexacloroetano, hexaclorobutadieno y hexaclorobenceno
- ☒ Cianuros

4.3. Legislación Ambiental que Aplica al uso de Combustibles Alternos

En esta sección solo se tratará de una manera general los aspectos de legislación ambiental en la que los combustibles alternos se encuentran relacionados, con respecto a su manejo y disposición final.

Normalmente los combustibles alternos son residuos industriales y la mayoría de ellos son considerados como residuos peligrosos por la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, por lo tanto su manejo y disposición final debe estar en base a dicha ley.

El organismo gubernamental que se encarga de formular las normas y otorgar permisos y licencias, al igual de inspeccionar y hacer cumplir dichos reglamentos y normas, es la Secretaría de Medio Ambiente Recursos Naturales y Pesca (SEMARNAP), por medio del Instituto Nacional de Ecología (INE) y de la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA), respectivamente.

Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente

Reglamento de la L. G. del E. E. y la P. al A. en Materia de Impacto Ambiental	Reglamento de la L. G. del E. E. y la P. al A. para la prevención y control de la contaminación generada por los vehículos automotores que circulan por el D.F. y los municipios de su zona conurbada	Reglamento de la L. G. del E. E. y la P. al A. en Materia de Residuos Peligrosos	Reglamento de la L. G. del E. E. y la P. al A. en Materia de prevención y control de la contaminación de la atmósfera	Reglamento para la prevención y control de la contaminación de aguas.	Reglamento para prevenir y controlar la contaminación del mar por vertimiento de desechos y otras materias.
--	---	--	---	---	---

otros:

- ◇ Acuerdos bilaterales y multilaterales
- ◇ Reglamento de la Secretaría de Comunicaciones y Transporte

La ley y reglamentos mencionados anteriormente, establecen para las empresas, diversas obligaciones en materia de protección al medio ambiente, obligaciones que, principalmente, se circunscriben a obtener licencias y permisos en los casos de que la operación manufacturera, comercial o de servicios, provoque contaminantes hacia la atmósfera, o cuando se descargan aguas residuales a las redes de alcantarillado municipal. En ambos casos las licencias y permisos deberán presentarse ante la SEMARNAP cuando las emisiones o descargas excedan los límites generales de tolerancia y los establecidos en las Normas Ecológicas.

En materia de aire, las Leyes y Reglamentos obligan a que en toda la República la calidad del aire sea satisfactoria para la vida humana y, por tanto, toda la emisión de contaminantes hacia la atmósfera debe ser reducida y controlada, por lo que la SEMARNAP tiene facultades para ordenar y exigir, a quienes emiten gases y polvos contaminantes, la instalación de equipos que controlen dichas emisiones, facultades que también tienen las autoridades de los Estados y Municipios.

Las empresas emisoras de contaminantes a la atmósfera, además de contar con autorización, deben emplear sistemas de control de emisiones que reduzcan la contaminación hasta los máximos permitidos por las Normas Ecológicas; deben investigar e informar a la SEMARNAP de los contaminantes que emiten y medirlos continuamente mediante sistemas de monitoreo, así como notificar cualquier cambio en sus emisiones que llegue a violar las Normas Ecológicas.

En materia de residuos peligrosos, la SEMARNAP ha reconocido que éstos incrementan la contaminación de la atmósfera, del suelo y de las aguas. Por lo cual todas las compañías generadoras o que manejen residuos peligrosos, deben obtener de la SEMARNAP autorización para realizar tales funciones, presentando los reportes correspondientes.

La Ley define a los residuos peligrosos como aquellos residuos, en cualquier estado físico, que por sus características Corrosivas, Tóxicas, Venenosas, Reactivas, Explosivas, Inflamables, Biológicas infecciosas o irritantes, representan un peligro para el equilibrio ecológico o el ambiente.

Las empresas que generen, manejen, importen o exporten residuos peligrosos, deben manifestar los que producen o manejan bajo la clasificación "CRETIB" (1. Corrosivos; 2. Reactivos; 3. Explosivos; 4. Tóxicos; 5. Inflamables y 6. Biológicos infecciosos).

Por último, la Ley y sus Reglamentos obligan a que en la realización de nuevas actividades empresariales que puedan crear desequilibrio ecológico, deban obtener una licencia de funcionamiento mediante la presentación de un cuestionario que informe sobre el impacto ambiental que tal nueva actividad pueda implicar.

Capitulo 5
Aseguramiento de combustible alternativo y
costo de inversión

5. Aseguramiento de combustible alternativo y costo de inversión.

En la implementación de combustibles alternos en la Planta Macuspana de Cementos APASCO, se definió usar aceite lubricante usado como primera etapa, debido al problema ambiental que presenta en el Estado, por su poder calorífico, cumplir con las especificaciones que debe cubrir un combustible alternativo, disponibilidad y por el permiso otorgado por las autoridades ambientales para disponer de combustibles alternos líquidos.

En base a lo anterior, en este capítulo se tratará la generación de aceite lubricante usado en el Estado de Tabasco. Este volumen de aceite puede incrementarse considerablemente si en el futuro se considera la generación de aceites usados por los Estados vecinos. También en este capítulo se analizará el porcentaje que representa en la alimentación al horno el aceite usado generado en el Estado, además del costo de inversión y el payback.

5.1 Generación de aceite usado en el Estado de Tab.

La generación importante de los aceites lubricantes usados en el Estado, está dada por dos grandes grupos que son:

PEMEX, con una generación aproximada de 386 m³/mes¹ y

Vehículos, con una generación aproximada de 318 m³/mes²

El reducido número macro-industrias del sector privado en el Estado generan relativamente poco aceite usado, sin embargo, también se tiene planeado hacer una recolección de este aceite, esta generación podría llegar a 60 m³/mes.

Dentro de este mismo grupo está considerada la misma Planta Macuspana con una generación aproximadamente de 3 m³/mes.

Generación Total de Aceite Lubricante Usado en el Estado: 764 m³/mes

¹Fuente: PEMEX Región Sur

²Fuente: Dirección General de Tránsito del Estado

Para la determinación de la generación de aceite usado por vehículos en el Estado, inicialmente se investigó la cantidad de vehículos que existen en el Estado, por tipo de servicio y clase, encontrándose lo siguiente:

Vehículos en el Estado de Tabasco por tipo de servicio y clase

Servicio	Clase	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	TOTAL Vehículos	
Gobierno	Autos	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	Camiones	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	Autobuses	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
Particular	Autos	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	Camiones	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	Autobuses	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
Total	Autos	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	Camiones	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Autobuses	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
TOTAL		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	

En base a lo obtenido anteriormente, se calculó la generación de aceite usado por vehículos, encontrándose 635,342 litros de aceite usado, suponiendo un promedio de 2 meses para cada cambio de aceite.

Por lo tanto, la generación de aceite usado por mes en el Estado, es de 317,671 litros, esto es, considerando solo los vehículos registrados en el Estado, faltando vehículos no residentes.

Generación de aceite usado en el Estado de Tabasco por vehículos automotores

Año 95

Servicio	Clase	No. de unidades	Litros	Municipios												TOTAL aceite (L)	
				Minatitlán	Amatitlán	Comalcalco	Minatitlán	Amatitlán	Comalcalco	Minatitlán	Amatitlán	Comalcalco	Minatitlán	Amatitlán	Comalcalco		
Automóvil	Automóvil	25	1,112														
	Camión	2	45														
	Camioneta	11	285														
Motocicleta	Motocicleta	12	242														
	Motocicleta	2	24														
	Motocicleta	11	218														
Motoscooter	Motoscooter	2	12														
	Motoscooter	1	1														
	Motoscooter	1	1														
TOTAL		51	1,658														
		15	364														
		36	1,294														

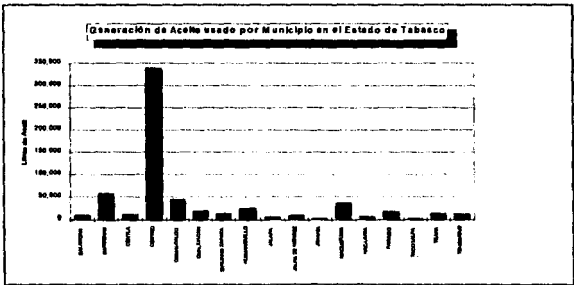


Fig. 5.1 Generación de aceite usado por Municipio en el Estado de Tabasco

Graficando la generación de aceite usado por municipio, se observa que donde más se genera es en el centro, seguido de Cárdenas, Comalcalco y Macuspana, por lo que se podría pensar establecer centros de acopio en estas regiones.

5.2. Requerimiento de Aceite Lubricante usado en el horno y Costo de Inversión.

5.2.1 Porcentaje que representa la generación de aceites usados en el Estado en la alimentación de combustible en el horno.

Combustible Convencional: Gas Natural

Consumo mensual

$$250,000 \frac{m^3}{Dia} \left| \frac{30 dias}{mes} \right| = 7.5 \times 10^6 \frac{m^3}{mes}$$

Energía Consumida por mes

$$7.5 \times 10^6 m^3 \left| 8,500 \frac{Kcal}{m^3} \right| = 6.375 \times 10^{10} Kcal$$

Combustible Alterno: Aceite Lubricante Usado

Suministro de aceite usado: 764 m³ por mes

Equivalente en energía proporcionada por mes:

Datos;

Densidad: 940 Kg/m³

Poder Calorífico: 7,500 Kcal/Kg

$$764 m^3 \left| 940 \frac{Kg}{m^3} \right| = 718,160 Kg$$

$$718,160 Kg \left| 7,500 \frac{Kcal}{Kg} \right| = 5.386 \times 10^9 Kcal$$

∴ El Porcentaje de sustitución de gas por aceite usado es:

$$\frac{5.386 \times 10^9 Kcal}{6.375 \times 10^{10} Kcal} \times 100 = 8.31\%$$

8. Aseguramiento de combustible alternativo y costo de inversión.

Volumen requerido mensual de aceites lubricantes usados para diferentes porcentajes

Características de los Combustibles		%	Volumen requerido (m3)	%	Volumen requerido (m3)
Cons. gas día (m3)	250,000	1.00	90	6.00	543
PC gas (Kcal/m3)	8,500	1.50	138	6.50	588
PC aceite (Kcal/Kg)	7,500	2.00	181	7.00	633
Densidad (Kg/m3)	940	2.50	226	7.50	678
		3.00	271	8.00	723
		3.50	316	8.50	769
		4.00	362	9.00	814
		4.50	407	9.50	859
		5.00	452	10.00	904
		5.50	497	10.50	949

%	Volumen requerido (m3)	%	Volumen requerido (m3)	%	Volumen requerido (m3)
11.00	995	16.00	1,447	21.00	1,899
11.50	1,040	16.50	1,492	21.50	1,944
12.00	1,085	17.00	1,537	22.00	1,989
12.50	1,130	17.50	1,582	22.50	2,035
13.00	1,176	18.00	1,628	23.00	2,080
13.50	1,221	18.50	1,673	23.50	2,125
14.00	1,266	19.00	1,718	24.00	2,170
14.50	1,311	19.50	1,763	24.50	2,215
15.00	1,356	20.00	1,809	25.00	2,261
15.50	1,402	20.50	1,854	25.50	2,306

5.2.2 Costo de Inversión

Para la quema de aceites y/o otros líquidos con propiedades combustibles, es necesario contar con un área de transferencia protegida por un dique además de una zona de recepción de pipas con bombas de descarga a tanques de almacenamiento, adicionalmente es necesario la adecuación del quemador principal o su sustitución, por otro lado el sistema de bombeo debe estar bajo el cuidado de la sala de control para que se integren los interlocks necesarios para la suspensión del combustible alterno en caso de fallas en la operación del horno.

Además de las instalaciones mínimas para el manejo de los combustibles alternos se requiere de un laboratorio que certifique las características de los mismos, así mismo es necesario la instalación en la chimenea principal de un equipo de monitoreo continuo.

A continuación se presenta un costo de inversión considerando los conceptos más representativos del proyecto:

Concepto	US. DLLS
Ingeniería/diseño	US\$ 30,000.00
Equipo de bombeo, filtrado, triturador, tuberías, válvulas	US\$ 119,250.00
Obra civil	US\$ 93,453.00
Obra eléctrica	US\$ 20,000.00
Pintura de equipos y estructura	US\$ 15,000.00
Estructuras metálicas	US\$ 54,760.00
Montaje de arreglo de tuberías e instrumentación	US\$ 35,600.00
Quemador para el comb. alterno	US\$ 145,000.00
Equipo de monitoreo Continuo	US\$ 275,000.00
Laboratorio de pruebas	US\$ 200,000.00
Costo TOTAL	US\$ 988,063.00

5.2.3 Payback

- ☛ Ahorro por sustitución del 8.31 % de aceite usado en el horno, (ver sección 5.2.1).

Costo por mcal de Gas Natural: N\$ 0.03596

Energía suministrada equivalente al 8.31 % de aceite usado:

$$5.386 \times 10^9 \text{ Kcal} \left| \frac{1 \text{ mcal}}{10^3 \text{ Kcal}} \right| = 5.386 \times 10^6 \text{ mcal}$$

∴

$$5.386 \times 10^6 \text{ mcal} \left| \frac{N\$0.03596}{1 \text{ mcal}} \right| = N\$193,680.56$$

Ahorro 1

- ☛ Ahorro por cobro de disposición final del aceite usado en el horno.

Debido al costo de inversión y al seguimiento que se le da al combustible alternativo en cuanto a su manejo y control, las industrias cementeras cobran alrededor de N\$ 0.25 por cada litro de aceite usado que se recibe en las Plantas.

∴

Para los 764 m3/mes de aceite usado, calculados para el Estado de Tabasco, (ver sección 5.1).

$$764000 \text{ litros} \left| \frac{N\$0.25}{1 \text{ litro}} \right| = N\$191,000.00$$

Ahorro 2
Adicional

☞ Beneficio total por quema de aceite usado en el horno (8.31%), por mes.

Ahorro TOTAL = Ahorro 1 + Ahorro 2

Ahorro TOTAL = N\$ 193,680.56 + N\$ 191,000.00 = **N\$ 384,680.56**

⊙ En base a lo anterior, el tiempo de recuperación del capital es:

Inversión: US\$ 985,063.00 = N\$ 6,224,796.90

Ahorro TOTAL: N\$ 384,680.56 / mes

Tasa de cambio: N\$ 6.30/US\$

$$\frac{N\$6,224,796.90}{N\$384,680.56 / mes} = 16.18 \text{ meses}$$

∴

Payback = 1.35 años

Capítulo 6

Protocolo de prueba de quemado

6. Protocolo de Pruebas de Quemado

Para poder implementar la quema de combustibles alternos en un horno cementero, se requiere elaborar con anterioridad un programa de pruebas de quemado (protocolo de pruebas de quemado) y presentarlo ante las autoridades ambientales, para obtener un permiso temporal, para realizar dichas pruebas. Para obtener un permiso definitivo en la quema de estos combustibles, las autoridades requieren la presentación del programa de pruebas de quemado, donde se demuestre por medio de análisis y peritos en la materia, de que al usar residuos combinados con el combustible convencional, no implica mayor emisión de contaminantes en el aire, que el usar solo el combustible convencional. En algunos casos donde se rebase el nivel actual para uno o más contaminantes, la obtención del permiso queda sujeta a un análisis de evaluación de riesgo.

6.1. Actividades Previas a las Pruebas de Quemado

La industria cementera que requiera quemar combustibles alternos, deberá inicialmente considerarlo como un proyecto, donde se analiza la factibilidad de la implementación del nuevo combustible, ya que estos, por lo general son considerados como residuos peligrosos por las autoridades.

Durante la elaboración del proyecto se deben de considerar los costos de inversión. Por lo regular las empresas no cuentan con sistemas de recepción y distribución de residuos, ni con sistemas de monitoreos continuos de emisión a la atmósfera, (normalmente el proceso cuenta con sistemas continuos de análisis de gases, pero estos se ocupan para el control de la operación del horno), en algunos casos el quemador principal no es el adecuado para la implementación del nuevo combustible y se tiene que modificar o sustituir. Estas actividades representan una parte importante en el costo de inversión, aunque cabe señalar que éste en la mayoría de los casos es recuperable en menos de dos años.

Una de las fases del proyecto, es la realización de un estudio de mercado, donde se identifiquen los posibles residuos considerados como combustible

alternos, esto es con el objetivo de asegurar el abastecimiento de dicho combustible.

Las actividades previas inherentes a la realización de las pruebas de quemado persiguen de manera general, contar oportunamente con los servicios, instalaciones, procedimientos, proveedores, etc. y todo tipo de facilidad para su realización con el mínimo de contratiempos y la mayor confiabilidad de resultados, siendo las más sobresalientes las siguientes:

6.1.1. Tramites de autorizaciones

a) *Protocolo de Pruebas de quemado:* Elaboración de un documento donde se especifiquen todas las actividades durante el periodo de pruebas de quemado con la finalidad de obtener la aprobación de las autoridades.

b) *Permisos y licencias para la construcción:* Una vez obtenido el permiso para efectuar las pruebas de quemado por parte de las autoridades ambientales (INE), se realizarán los trámites legales para dar inicio a los trabajos de ingeniería y construcción, donde se desarrollará la ingeniería básica e ingeniería de detalle para las instalaciones del manejo del combustible alternativo.

6.1.2. Selección del Monitoreo continuo de emisiones en chimenea, *Continuous Emission Monitoring Systems (CEM)*

Para poder quemar residuos industriales en un horno cementero, las autoridades ambientales han establecido la condición de monitorear los gases de combustión emitidos a la atmósfera de una manera continua, para poder tener un control en las emisiones a la atmósfera de posibles contaminantes.

◆ **Contaminantes que hay que monitorear:**

Un analizador debe monitorear varios gases contaminantes al mismo tiempo. monitoreando la concentración de vapor de agua permite dar información a las concentraciones contaminantes en base seca o húmeda.

Gases típicas

CO 0 - 3000 ppm

NO 0 - 300 ppm

SO₂ 0 - 1500 ppm

NO₂ 0 - 250 ppm

Otros gases:

CO₂ 0 - 25%

H₂O (g) 0 - 20%

NH₃ 0 - 100 ppm

HCl 0 - 150 ppm

◆ **Selección del analizador**

La mayoría de los analizadores de gas de emisión de la chimenea son fotómetros de rayos ultravioletas o de rayos infrarrojos, o utilizan los métodos químicoluminiscentes. La selección del analizador depende primeramente de los gases que tienen que monitorearse. La tabla 6.1 muestra qué gases pueden medirse con cada analizador.

Tabla 6.1 Selección del analizador por tipo de gas a medir

Componente	Fotómetro ultra-violeta	Fotómetro infr-rojo	Químico- luminescencia
Monóxido de carbono		✓	
Oxido nítrico	✓	✓	✓
Dióxido de azufre	✓	✓	
Dióxido de Nitrógeno	✓	✓	✓
Dióxido de carbono		✓	
Vapor de agua		✓	

La tabla de componentes que ha de medirse indica que el sistema de infrarrojo es más apropiado para la aplicación en el horno de cemento.

◆ Instalación típica

En la instalación típica (Fig. 6.1), el analizador se monta en la chimenea. Las señales se transmiten digitalmente a una unidad de control del analizador. La información puede retransmitirse como una salida de corriente de 4-20 mA por un interfaz de impresor en paralelo.

Instalación Típica de un Sistema de Monitoreo Continuo de Emisiones (CEM)

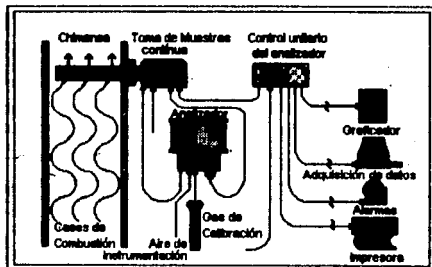


Fig. 6.1 Continuous Emission Monitoring Systems (CEM)

6.1.3. Selección de laboratorios de pruebas

Las pruebas o análisis rutinarios sobre las materias primas y productos se llevarán a cabo por personal de la empresa, sin embargo para aquellos análisis especiales requeridos durante las pruebas de quemado, se contratarán prestadores de servicio y laboratorios externos, los cuales deberán ser seleccionados y calificados previamente, y propuestos para su aprobación al INE.

Los análisis y pruebas que requerirán de estos, serán principalmente las determinaciones de: dioxinas, furanos, Triclorobenceno (TCB), muestreos isocinéticos, metales pesados, cloro, análisis de combustible, entre otros.

6.1.4. Desarrollo del manual de calidad

Se desarrollará el manual de calidad bajo el cual deberán llevarse las pruebas. En tal documento se incluirán los procedimientos específicos para las tomas de muestra, preservación y análisis de las mismas, indicando los métodos a seguir y contendrá las guías para implementar las cadenas de custodia en cada caso.

6.1.5. Ajustes conforme a requerimiento de la SEMARNAP

De acuerdo a las observaciones que SEMARNAP (INE) haga al documento presentado, con respecto al alcance de análisis propuestos y/o a los requerimientos en el oficio de autorización, se harán los ajustes necesarios para ejecutar las pruebas en campo.

6.2. Pruebas de Quemado

El proyecto tiene como objetivo el utilizar, de manera permanente, combustibles alternos sólidos o líquidos en el horno de clinker, sustituyendo el máximo posible del combustible convencional.

6.2.1. Objetivo de las pruebas de quemado

El objetivo fundamental de las pruebas de quemado es mostrar técnicamente y mediante pruebas de campo controladas:

- a) Que el uso de materiales residuales como combustible en el horno de clinker, no alteran la dinámica del proceso ni afecta la operación, productividad y calidad del cemento.
- b) Por las características de temperatura y tiempo de residencia, la destrucción térmica es eficiente.
- c) El propio material utilizado como materia prima del clinker y las condiciones de proceso son en sí mismos elementos de control de emisiones, que en una incineración tradicional requieren de sofisticadas tecnologías de tratamiento. Es decir, el proceso de clinkerización es intrínsecamente seguro para la disposición final de residuos con energía aprovechable.
- d) Mostrar la eficiencia de remoción del principal trazador de la destrucción e indicador de la no formación de dióxinas y furanos, el HCl.
- e) Por otro lado, tiene el propósito de obtener la autorización definitiva para la implementación de combustible alterno .

6.2.2. Puntos de toma de muestras

◆ En proceso

En el proceso durante las pruebas de quemado se muestrearán las siguientes corrientes en los puntos específicos que se indican a continuación.

CORRIENTE	PUNTO DE MUESTREO
• Combustible alterno	Línea de alimentación al horno
• Crudo	Después de la descarga del molino
• Clinker	Salida del enfriador del clinker
• Chimenea	Puertos de muestreo de chimenea principal

- Con objeto de complemento del balance se tomará medición de flujo en chimenea del enfriador del horno (Chimenea secundaria)

En la chimenea principal será instalado el sistema de monitoreo continuo.

◆ Puntos de monitoreo en aire ambiente

La selección del área para ubicación de monitores del aire ambiente se hará considerando "el receptor expuesto", es decir a través de modelación, buscar el área poblada donde puede incidir la mayor influencia de la pluma de chimenea, para tal efecto se considerará la información disponible de vientos, recopilada del sitio y del servicio meteorológico nacional, así como el plano local.

6.2.3. Selección de variables a medir

Las variables a medir, serán fundamentalmente aquellas que se requiera, por SEMARNAP y que se indicarán en la autorización correspondiente a las pruebas de quemado y las necesarias para complementar el balance de masa y energía, así como la eficiencia de destrucción.

Dependiendo de lo que indiquen las autoridades, las variables ha medir durante las pruebas de quemado son las siguientes :

◆ Proceso

a). Combustibles

Tabla 6.2 Variables ha medir durante las pruebas de quemado

PARÁMETRO	LIQUIDO	SOLIDO
Arsénico.	mg/lt	mg/kg
Bario	mg/lt	mg/kg
Plata	mg/lt	mg/kg
Plomo	mg/lt	mg/kg
Níquel	mg/lt	mg/kg
Zinc	mg/lt	mg/kg
Talio	mg/lt	mg/kg
Cadmio	mg/lt	mg/kg
Cromo VI	mg/lt	mg/kg
Vanadio	mg/lt	mg/kg
Cromo III	mg/lt	mg/kg
Selenio	mg/lt	mg/kg
mercurio	mg/lt	mg/kg
Cloro	mg/lt	mg/kg

... Continuación Tabla 6.2 Variables ha medir durante las pruebas de quemado

PARÁMETRO	LIQUIDO	SOLIDO
Cenizas	%w	%w
Azufre	%w	%w
Humedad	%w	%w
Bifenilo policlorados	%w	%w
Dioxinas policloradas	ug/ft	No aplica (NA)
Benzofuranos policlorados	ug/ft	NA
Caracterización física		
Densidad a 20°	x	NA
Poder calorifico (cal/g)	x	NA
Sólidos en suspensión (%)	x	NA
Viscosidad	x	NA

b). **Mediciones en chimeneas.**

Continua

CO (ppmv)
 HCl (ppmv)
 HCl (ppmv)
 SO₂ (ppmv)
 CO₂ (%v)
 O₂ (% v)
 NH₃ (ppmv)
 NO_x (ppmv)
 H₂O (%v)

No continua

Dioxinas (ng/m³)
 Furanos (ng/m³)
 Cloro (ppmv)
 Material Particulado (mg/m³)
 Metales (mg/m³)

c). En clinker en cada corrida de pruebas

As (mg/Kg)

Ba (mg/Kg)

Cd (mg/Kg)

Hg (mg/Kg)

Ag (mg/Kg)

Pb (mg/kg)

Se (mg/Kg)

Zn (mg/kg)

Cr VI (mg/Kg)

Cr III (mg/kg)

Ni (mg/kg)

Talio (mg/kg)

Vanadio (mg/kg)

d). Cloro y cloruros.

El cloro total deberá ser medido en todas las corrientes de entrada al sistema así como en la chimenea.

Todas las variables mencionadas serán determinadas en cada corrida completa que se efectuó durante el período de las pruebas de quemado y se realizará con combustible alterno, y sin combustible alterno.

◆ Aire ambiente

En aire ambiente se realiza únicamente el monitoreo de PST (Partículas Suspendidas Totales) y HCl antes y durante las pruebas de quemado, así como el análisis de filtros por metales.

6.2.4. Determinación de la eficiencia de destrucción y remoción

A fin de garantizar que la eficiencia de destrucción durante las pruebas de quemado sea sin duda alguna lo suficientemente soportada técnicamente, se plantea la introducción al sistema de uno o varios componentes trazadores en cantidades conocidas en el combustible alterno a utilizarse. Las corridas donde se agregaría, se les conoce como "pruebas de spike" o de "enriquecimiento".

a). Eficiencia de destrucción

Para determinar la eficiencia de destrucción se adiciona una cantidad conocida de un compuesto térmicamente estable y por ende, difícil de destruir con calor, y se asume el siguiente criterio:

Si tal compuesto es destruido con una eficiencia igual o superior al 99.99% por el sistema particular, entonces queda demostrada la capacidad del horno, sometido a las pruebas, para destruir de manera eficiente y segura todos aquellos compuestos cuya estabilidad térmica sea igual o inferior al componente probado.

Un compuesto usado comúnmente es el 1,2,4-triclorobenceno, u otro compuesto de características similares y también perteneciente al grupo 1

De acuerdo con los datos de la Universidad de Daytona, en U.S.A. el 1, 2, 4, Triclorobenceno se encuentra dentro del grupo clase 1, los cuales son más estables térmicamente y por consiguiente los que poseen menor "índice de incinerabilidad" es decir más difíciles de destruir mediante el uso de calor. Su índice, (rank) es de 29, junto con el 1, 2, 3, 5, Tetraclorobenceno.

En otras seis clases (clase 2 a la clase 7) se ubican compuestos de menor estabilidad térmica y por consiguiente de mayor índice de incinerabilidad, es decir, conforme aumenta su índice o número de clase, se podrá destruir con mayor facilidad en hornos industriales o incineradores.

Para preparación de una prueba de este tipo, previamente debe prepararse la mezcla de altermo con el componente de difícil destrucción. La eficiencia de destrucción del sistema quedaría entonces representada por las trazas del TCB (Triclorobenceno) que se encontraran en chimeneas en relación a la cantidad total alimentada al sistema, es decir:

$$\text{Eficiencia} = (1 - \text{TCB en chimenea} / \text{TCB en combustible}) * (100)$$

b). Eficiencia de remoción (o capacidad de asimilación)

Para determinar la eficiencia de remoción de un componente específico, tales como los metales pesados ó cloruros, el "enriquecimiento" deberá hacerse con cantidades conocidas de tales componentes.

La eficiencia de remoción o asimilación del sistema estará representada por la presencia del o los componentes en estudio, en el efluente gaseoso de chimenea, en revelación al total alimentado al sistema es decir:

$$\text{Eficiencia de Remoción} = (1 - \text{Emisión} / \text{Total Alimentado}) * (100)$$

c). Otras variables

Además de la variables inherentes al componente de "sipse", se tomarán aquellas de monitoreo continuo en chimenea y las involucradas en las pruebas. Por ejemplo dentro de un "sipse" con altermos líquidos para un componente clorado, se tomará además del compuesto específico, el HCl/Cl₂ así como las dióxidas y furanos en chimenea.

6.2.5. Uso de combustible alterno

Durante esta etapa se llevarán a cabo las pruebas de quemado de combustible alterno. Realizando las siguientes actividades:

- a) Efectuar las pruebas de quemado del combustible alterno bajo las condiciones más críticas del horno para el quemado de combustible, correspondiendo a las de máxima producción de clínker.
- b) Llevar a cabo pruebas con combustible alterno "enriquecido" con 1,2,4-triclorobenceno (TCB) ó un compuesto similar.
- c) Determinar la curva de caracterización del sistema, correlacionando el porcentaje de sustitución contra las emisiones en la chimenea.
- d) Determinar las curvas de eficiencia de destrucción, remoción y emisiones en función del TCB agregado al combustible alterno.
- e) Llevar a cabo pruebas de "spike" para eficiencia de remoción de algunos metales.

Antes de efectuar las pruebas de quemado del combustible alterno, se deben de tomar en cuenta los siguientes puntos:

- Haber concluido las pruebas de fondo (realizar un monitoreo a todo el sistema con combustible convencional, con el objeto de tener un comparativo con el nuevo combustible) y validado los resultados.
- Contar con el suficiente volumen de combustible alterno.
- Contar con el suficiente volumen de TCB, o del compuesto similar, para las pruebas de "spike" de destrucción.
- Contar con la suficiente cantidad de metales de los que ha de hacerse el spike de remoción.
- Considerar los ajustes que se requieran de acuerdo a los resultados de las pruebas de fondo.

6.2.6. Caracterización

- Las corrientes, puntos de muestreo y variables a determinar serán las mismas que se consideraron durante la prueba de fondo o background, así como los métodos a utilizar.
- Las particularidades de esta prueba son las siguientes:
 - a) Se llevará registro de la alineación del alterno y el récord de las horas de operación, así como de los paros o interrupciones del combustible cuyas causas podrán ser principalmente:
 - Por falta de alternos en almacén
 - Por paro del horno no previsto con anterioridad
 - Por accionamiento de un interlock con el sistema de suministro
 - Por salida de operación del CEM.

En la propia bitácora, se registrará el % de sustitución, la calidad de los alternos, el TCB adicionado durante las pruebas de spike, y/o en su caso los metales adicionados con motivo de pruebas de "spike" o "enriquecimiento".

b) Previamente se fijará el porcentaje máximo de combustible a sustituir en el horno, de tal suerte que tal valor representará la máxima sustitución a alcanzar durante las pruebas en el horno. Y bajo la operación normal del mismo, este objetivo será alcanzado paulatinamente.

Los cambios importantes, si los hay, se presentarán en los registros continuos del CEM y operación.

6.2.7. Análisis

Todas las corrientes de entrada y salida del sistema de producción del Clinker serán analizadas como se indica en la tabla 6.3

Los análisis que darán resultados en forma continua se les denominará "continuo"; los análisis que se harán en forma discreta pero durante todo el periodo de prueba se les denominará "rutinario" y aquellos análisis que se realizarán solamente durante las corridas completas (aquellas en las cuales se tomarán todos los parámetros) se les denominarán "especiales".

◆ Materias primas

Tabla 6.3 Análisis en materias primas y combustibles

ANÁLISIS	COMBUSTIBLES ALTERNOS	GAS NATURAL	CRUDO	CLINKER	TIPO
Poder calorífico.	XXX	XXX	-	-	Rutinario
PCB's	XXX	-	XXX	-	Especial
Agua	XXX	XXX	XXX	-	Especial
Cloro total	XXX	-	XXX	XXX	Especial
Azufre total	XXX	XXX	XXX	XXX	Especial
Dióxinas	XXX	-	XXX	-	Especial
Furanos	XXX	-	XXX	-	Especial
Cenizas	XXX	-	XXX	-	Especial
Densidad	XXX	-	XXX	-	Especial
Carbono	XXX	XXX	XXX	-	Especial
Hidrógeno	XXX	XXX	XXX	-	Especial
Oxígeno	XXX	XXX	-	-	Especial
Arsénico	XXX	-	XXX	-	Especial
Bario	XXX	-	XXX	-	Especial

... Continuación Tabla 6.3 Análisis en materias primas y combustibles

ANÁLISIS	COMBUSTIBLES ALTERNOS	GAS NATURAL	CRUDO	CLINKER	TIPO
Cadmio	xxx	-	xxx	-	Especial
Plomo	xxx	-	xxx	-	Especial
Mercurio	xxx	-	xxx	-	Especial
Selenio	xxx	-	xxx	-	Especial
Plata	xxx	-	xxx	-	Especial
Níquel	xxx	-	xxx	-	Especial
Cromo VI	xxx	-	xxx	-	Especial
Cromo III	xxx	-	xxx	-	Especial
Talio	xxx	-	xxx	-	Especial
Vanadio	xxx	-	xxx	-	Especial
Zinc	xxx	-	xxx	-	Especial
Perdidas por ignición	-	-	xxx	xxx	Rutinario
SiO ₂	-	-	xxx	xxx	Rutinario
Al ₂ O ₃	-	-	xxx	xxx	Rutinario
Fe ₂ O ₃	-	-	xxx	xxx	Rutinario
CaO	-	-	xxx	xxx	Rutinario
MgO	-	-	xxx	xxx	Rutinario
K ₂ O	-	-	xxx	xxx	Rutinario
Na ₂ O	-	-	xxx	xxx	Rutinario
CaO libre	-	-		xxx	Rutinario
CaCO ₃	-	-	xxx	xxx	Rutinario

La tabla 6.3 está hecha considerando combustibles alternos líquidos

◆ Análisis de Chimenea

El análisis de chimenea se realizará de forma continua para los parámetros trazadores de la operación mediante el equipo de monitoreo continuo (CEM).

- Se harán muestreos isocinéticos, durante las corridas completas de caracterización, para determinación de dioxinas, furanos, TCB, PST y los metales pesados como se indica en la tabla 6.4
- Se hará muestreo proporcional para la determinación de cloro en paralelo con los muestreos isocinéticos.

Tabla 6.4 Análisis de chimenea

PARÁMETROS	MUESTREO	ANÁLISIS	TIPO
	Isocinético		
PST	Métodos EPA 5	Gravimétrico	Especial
Análisis del Filtro			
Arsénico	Extracción y análisis sobre el material colectado durante el muestreo	Plasma o Equiv.	Especial
Bario		Plasma o Equiv.	Especial
Cadmio		Plasma o Equiv.	Especial
Plomo		Plasma o Equiv.	Especial
Mercurio		Plasma o Equiv.	Especial
Selenio		Plasma o Equiv.	Especial
Plata		Plasma o Equiv.	Especial
Cromo VI		Plasma o Equiv.	Especial
Cromo total		Plasma o Equiv.	Especial

... Continuación Tabla 6.4 Análisis de chimeneas

PARÁMETROS	MUESTREO	ANÁLISIS	TIPO
Níquel		Plasma o Equiv.	Especial
Vanadio		Plasma o Equiv.	Especial
Zinc		Plasma o Equiv.	Especial
Talio		Plasma o equiv.	Especial
Dióxinas	Método EPA-23	Espectometría de masa de baja resolución y cromatografía de gases con columna de alta resolución	Especial
Furanos			Especial
TCB			Especial
Cl ₂			Especial
HCl	Determinaciones con el CEM	Infrarrojo	Continuo
CO		Infrarrojo	Continuo
CO ₂		Infrarrojo	Continuo
SO ₂		Ultravioleta o infrarrojo	Continuo
NO _x		Quimiluminiscencia	Continuo
O ₂		Celda de Oxido de Circonio	Continuo
HCT		Ionización de flama	Continuo
NH ₃		Infrarrojo	Continuo
H ₂ O		Infrarrojo	Continuo

◆ Análisis en ambiente

El análisis de aire ambiente se efectuará bajo el criterio de "receptor expuesto" para lo cual se seleccionará la zona de muestreo de acuerdo a la población cercana más influenciada por la pluma de chimenea la cual corresponde a la más factible de afectación, previa modelación basada en la información meteorológica del sitio, así como análisis del plano local y de campo.

6.3. Actividades Posteriores a las Pruebas de Quemado

Una vez concluidas las pruebas de quemado se procederá a la realización de las siguientes actividades :

- Análisis, clasificación y validación de los resultados analíticos de todas y cada una de las muestras.
- Análisis y clasificación de los reportes de las actividades de campo
- Análisis de la información climática del sitio
- Integración del reporte final de pruebas incluyendo las observaciones y conclusiones de las mismas debidamente soportadas.

6.4. Normatividad

6.4.1. Análisis de riesgo como marco de referencia

Además de seguir los procedimientos de las normas nacionales que regulen la emisión de contaminantes a la atmósfera, provenientes de actividades de incineración o destrucción térmica de residuos en hornos, se considerarán los procedimientos de los Estados Unidos de Norteamérica, en donde se establecen límites de emisión, caso por caso, en base a un análisis de riesgo que se realiza previo a la autorización de un horno para quemar residuos.

Tal análisis de riesgo consiste en modelar, mediante el procedimiento "Screen" de la EPA la emisión de chimenea, considerando las propiedades del sitio, fundamentalmente la topografía, mediante el cual se establece el máximo potencial de emisión de contaminantes resultantes de la destrucción del residuo o de sus impurezas, tales como metales pesados cancerígenos y cloruros de hidrógeno, que un horno en particular pudiera emitir.

El análisis realizado para la planta de cementos APASCO, en Macuspana, dio como resultado los siguientes límites máximos de emisión en chimenea; que garantizan una operación ambientalmente segura.

CONTAMINANTE		LIMITE MÁXIMO (g/h)
NOMBRE	Fórmula	
Cloro	Cl ₂	2,890.00
Cloruro de hidrógeno	HCl	50,328.00
Arsénico	As	16.40
Bario	Ba	359,780.00
Cadmio	Cd	39.90
Cromo III	Cr III	7,196,760.00
Cromo VI	Cr VI	5.98
Plomo	Pb	610.00
Mercurio	Hg	2,120.00
Plata	Ag	21,560.00
Talio	Tl	3,560.00
Selenio	Se	610.00

Tales límites se interpretan de la siguiente manera:

Representan la cantidad máxima a emitir de cada contaminante que resulta ser ambientalmente segura, sin poner en riesgo la salud de ningún receptor que pudiera ubicarse en las zonas de influencia de la pluma dentro de la región donde se ubica la planta.

6.4.2. Otros límites de referencia para chimenea

La Norma Oficial Mexicana NOM-CCAT-002-ECOL/93 establece los niveles máximos de emisión a la atmósfera de partículas sólidas, que para el proceso de calcinación son:

Capacidad de Proceso	Límite Máximo (Kg/hr)
Menor a 300 Tons/Hr	$0.6319^{\circ}\text{C} \cdot \exp(0.7502)$
Igual o mayor a 300 Ton/Hr	0.15°C

Donde C es igual a Cantidad de material alimentado en Ton/Hr

Para la emisión de polvo por la chimenea del enfriador de clinker el nivel máximo permisible es de 150 mg/Nm³ a 298 °K, 760 mmHg y base seca.

Cabe mencionar que en USA existen dos límites de emisión de CO, uno es un límite alternativo que se fija durante las pruebas de quemado y puede ser mayor de 100 ppm. siempre y cuando los hidrocarburos totales en chimenea no rebasen las 20 ppm, este límite se aplica normalmente a hornos industriales como los de cemento, en virtud de la imposibilidad de lograr niveles de 100 ppm de CO o menores en tales procesos.

La intención fundamental es garantizar una elevada eficiencia de combustión y no emitir hidrocarburos no quemados a la atmósfera.

Ambos parámetros son medidos durante las pruebas de quemado en promedios horarios, reportando los HC como propano.

6.4.3. Límites de referencia de calidad del aire

Para otros contaminantes como SO_2 , NO_2 se tomarán como referencia los criterios de calidad de aire, como las normas Oficiales Mexicanas NOM-022-SSAI-1993 y NOM-023-SSAI-1993, publicadas en el diario oficial de la federación y podrá compararse modelando la emisión de chimenea con tales criterios.

CONTAMINANTE	CRITERIO	TIEMPO DE EXPOSICIÓN
Bióxido de Azufre	0.13 ppm	24 hrs.
Dióxido de Nitrógeno	0.21 ppm	1 hr.

Para el HCl y Cl_2 se tomarán como marco de referencia los estándares de calidad de aire siguientes:

a) HCl

PAÍS	CRITERIO	TIEMPO DE EXPOSICIÓN
Alemania	700 ug/m ³	30 min.
Italia	300 ug/m ³	30 min.
Canadá	100 ug/m ³	30 min.

b) CLORO (Cl_2)

PAÍS	CRITERIO	TIEMPO DE EXPOSICIÓN
Alemania	300 ug/m ³	30 min.
Canadá	300 ug/m ³	30 min.

6.4.4. Eficiencia de destrucción

La eficiencia de destrucción de acuerdo a EPA no debe ser menor de 99.99% para los constituyentes orgánicos peligrosos alimentados con el combustible, lo cual debe ser demostrado con las pruebas de quemado.

Capítulo 7

Resultados de pruebas



7. Resultados de pruebas

El presente reporte muestra los resultados de las pruebas de quemado efectuadas en la planta de Cementos APASCO, ubicada en Ramos Arizpe, Coah.

Tales pruebas fueron autorizadas mediante el oficio A.O.O./D.G.N.A.-007189, del 11 de agosto de 1993, donde se indican las condiciones y parámetros a medir durante las pruebas de quemado.

Objetivos:

- a) **Mostrar que el uso de combustibles alternos en el horno de cemento no altera la dinámica del proceso.**
- b) **Mostrar el comportamiento de emisiones sin el uso de combustibles alternos y con el uso de los mismos.**
- c) **Mostrar la eficiencia de destrucción del sistema en base a un componente de difícil destrucción.**
- d) **Mostrar la eficiencia de remoción del HCl, generado por la combustión de organoclorados, y principal trazador de la destrucción de los residuales e indicativo de la NO FORMACIÓN de dioxinas y furanos.**

7.1. Desarrollo de las Pruebas

Las pruebas de quemado se llevaron a cabo durante el periodo comprendido entre el 17 de mayo y el 8 de junio de 1994, sin embargo se tiene información recopilada desde el día primero de mayo generada por dos sistemas de monitoreo continuo instalados con motivo de las pruebas, uno de ellos se instaló en chimenea y se le denominó "CEM", mientras que el segundo se utilizó para aire ambiente y se le denominó "OPSIS".

El CEM se instaló de manera definitiva como equipo de medición continua para estar permanentemente operando durante la operación del horno, aún después de las pruebas de quemado.

El OPSIS se instaló únicamente para cubrir de manera continua todo el período de pruebas.

Además del monitoreo continuo, con los equipos anteriores, se realizaron cinco corridas completas con el fin de caracterizar todos los parámetros requeridos por las autoridades ambientales y aquellos complementarios para evaluar la operación del sistema de clinkerización, con y sin combustible alterno. Tales corridas se describen a continuación:

a) Una de fondo, reconocimiento o "background", en la cual se realizaron todas las determinaciones a la condición normal de una planta de cemento, operando con el combustible convencional en un proceso de clinkerización.

b) Con combustible alterno:

Denominadas "primer y segundo alterno" y correspondieron a la condición en la cual se sustituyó parcialmente el combustible alterno en el quemador principal del horno de clinker.

c) Dos denominadas de "spike" o de "enriquecimiento":

Tales corridas correspondieron a la condición de combustible alterno "enriquecido" con un componente de difícil destrucción ubicado dentro del grupo clase 1, según la clasificación de la Universidad de Daytona, USA.

El objetivo específico de las pruebas de spike fue el determinar tanto la eficiencia de destrucción de los componentes orgánicos estables térmicamente, como la eficiencia de remoción o asimilación del cloruro de hidrógeno formado durante la combustión del mismo componente. De esta manera se garantiza la representatividad de las pruebas para todos aquellos componentes de estabilidad similar o menor al componente probado, es decir, con mayor índice de incinerabilidad, estas corridas correspondieron entonces a las condiciones más drásticas a que se sujetó el horno del clinker para mostrar su capacidad de destrucción de orgánicos y de asimilación de los cloruros presentes en el sistema.

Durante cada una de las corridas arriba mencionadas se hicieron determinaciones en las corrientes principales del sistema de fabricación del clinker, incluida la chimenea y el aire ambiente.

Las corrientes muestreadas en el proceso fueron:

- Chimenea
- Combustible alterno
- Combustible convencional
- Clinker y
- Crudo

El aire ambiente fue muestreado y analizado en la dirección de los vientos dominantes, en la zona de mayor influencia de la pluma de chimenea.

Durante las pruebas se realizaron muestreos discretos o puntuales monitoreos continuos. Los primeros se efectuaron en todas las corrientes del proceso incluida la chimenea, así como en el aire ambiente, estos muestreos sólo se realizaron durante las cinco corridas arriba mencionadas. Los continuos, que inclusive cubrieron todo el periodo, solo se realizaron en chimenea y en aire ambiente, pero incluyeron los parámetros más relevantes de la medición, incluido el HCl como principal trazador de la quema de alternos.

Con el CEM se registraron los parámetros indicativos de la destrucción y remoción, que son el HCl y los hidrocarburos totales (HCT), así como el monóxido de carbono como el parámetro indicativo de la combustión en el sistema de clinkerización.

Las otras variables medidas de forma continua en la chimenea conforme al oficio de autorización fueron: SO_2 , NH_3 , NO_x , CO_2 , O_2 y H_2O .

Con el OPSIS se registraron en continuo el HCl, el NO_2 y el SO_2 en el aire ambiente, así como las variables climatológicas de temperatura y viento.

El resto de variables requeridas se determinaron con muestreos discretos en las corrientes, utilizando el equipo y métodos apropiados, que para el caso de chimenea correspondieron a los de USEPA y para aire ambiente se tomaron los métodos también de USEPA y las normas oficiales mexicanas correspondientes.

7.2. Resultados de Pruebas

Los resultados analíticos correspondientes a las cinco corridas completas, conforme a lo requerido en el oficio de autorización, se ilustran en las Tablas 7.1 (comb. alterno), 7.2 (combustóleo), 7.3 (chimenea), 7.4 (clinker), 7.5 (crudo), para las corrientes de proceso y en las Tablas 7.6 (opsis, promedios y máximos), 7.7 (muestreos no continuos), para el aire ambiente.

La parte sombreada de tales tablas corresponden a los parámetros requeridos por las autoridades ambientales, mientras que el resto son variables complementarias de referencia e información para los balances de materia y energía.

En la Tabla 7.1 se presentan los análisis realizados al combustible alterno utilizado durante cuatro pruebas, dos de ellas con "spike" o enriquecimiento con 1,2,4 triclorobenceno (TCB) ubicado dentro del grupo 1 de la clasificación de la Universidad de Daytona, los cuales tienen la mayor estabilidad térmica y por consiguiente su destrucción mediante el uso de calor presenta mayor dificultad.

Todos los parámetros de esta tabla se muestran en el mismo orden de magnitud a excepción de las pruebas de spike, donde se presenta valores mucho mayores de cloro, precisamente por la adición del TCB.

CORRIENTE:1

Tabla 7.1 Resumen de resultados de las pruebas de quemado (Comb. Alterno)

	Fecha	1ro de Junio	17 de Mayo	8 de Junio	19 de Mayo	3 de Junio
	Nombre prueba	Background	Primer alterno	Segundo Alterno	Primer Spike	Segundo Spike
Poder calorífico	(Kcal/Kg)	NA	9,609	9,376	9,480	9,306
PCB's	ppm	NA	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
Pesticidas	ppm	NA	<0.176	<0.176	<0.176	<0.176
Semivolátiles	ppb	NA	21,463,691	445,75,109	15,086,375	93,127
Agua	%	NA	0.24	0.79	0.67	1.4
Cloro	ppm	NA	<60	455	8,110	8,227
Azufre	%	NA	0.009	0.076	0.054	0.109
Dioxinas	ppb	NA	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
Furanos	ppb	NA	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
Cenizas	%	NA	0.2	.39	.27	.71
Densidad	gr/ml	NA	0.985	0.987	0.997	0.994
Arsénico	ppm	NA	<0.02	4.8	5.8	6
Bario	ppm	NA	<0.0001	0.5	0.11	0.25
Cadmio	ppm	NA	<0.004	0.2	<0.004	0.2
Plomo	ppm	NA	<0.04	<0.004	<0.04	<0.04
Mercurio	ppm	NA	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001
Selenio	ppm	NA	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
Plata	ppm	NA	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
Zinc	ppm	NA	2.2	17.2	5.6	12.8
Cromo	ppm	NA	<0.05	<0.05	<0.05	1
Niquel	ppm	NA	<0.015	2.3	0.42	2
Carbono	%	NA	84.8	84.92	84.8	84.8
Hidrógeno	%	NA	9.42	9.98	9.34	10
Oxígeno	%	NA	5.6	5	5.7	5
TCB	%	NA	NA	NA	1.57	1.6
Sólidos Suspendidos	%	NA	1.62	3.4	1.3	3.8
Viscosidad	cp	NA	97.6	76.1	88.6	74.8

CORRIENTE: 2

Tabla 7.2 Resumen de resultados de las pruebas de quemado (Comb. Convencional)

	Fecha	1ro de Junio	19 de Mayo	8 de Junio	17 de Mayo	3 de Junio
	Nombre prueba	Background	Primer Spike	Segundo Spike	Primer Alterno	Segundo Alterno
Poder calorífico	(Kcal/Kg)	10218	10266	10187	10231	10241
PCB's	ppm	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
Pesticidas	ppm	<0.176	<0.176	<0.176	<0.176	<0.176
Semivolátiles	ppb	281002	19209701	10187	20354401	102461
Agua	%	0.39	0.06	1.7	<0.2	
Cloro	ppm	<60	177	184	<60	154
Azúfre	%	3.25	3.35	3.95	3	10.82
Dioxinas	ppb	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
Furanos	ppb	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
Cenizas	%	0.07	0.15	0.14	0.24	0.17
Densidad	gr/ml	1.05	0.999	1	0.984	1
Arsénico	ppm	<0.02	0.14	<0.02	0.1	<0.02
Bario	ppm	0.3	<0.0001	0.67	0.09	0.2
Cadmio	ppm	<0.004	<0.004	<0.004	0.2	<0.004
Plomo	ppm	<0.04	<0.04	<0.04	<0.04	<0.04
Mercurio	ppm	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001
Selenio	ppm	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
Plata	ppm	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001

... Continuación Tabla 7.2 Resumen de resultados de las pruebas de quemado
(Comb. Convencional)

	Fecha	1ro de Junio	19 de Mayo	8 de Junio	17 de Mayo	3 de Junio
	Nombre prueba	Background	Primer Spike	Segundo Spike	Primer Alamo	Segundo Alamo
Zinc	ppm	2.1	5.6	2.2	1.8	1.3
Cloro	ppm	<0.007	<0.007	<0.007	<0.007	<0.007
Níquel	ppm	48.3	38.2	46.5	40.2	42.2
Carbono	%	85.3	85.2	85.13	85	85.34
Hidrógeno	%	10.45	10.3	10.24	10.3	10.3
Oxígeno	%	0.3	0.5	0.28	0.47	0.26
TCB	%					
Bólidos	%	76.6	76.6	77.8	81.8	78.2
Sulfuros						
Viscosidad	cp	18832	17218	18426	18121	18536

En la tabla 7.2 se presentan los resultados analíticos del combustible utilizado durante las pruebas, el contenido de cloro llega a ser hasta del orden de 180 ppm y el Níquel es relativamente alto, del orden de las 40 ppm contra 2 del alamo. De esta tabla se descartó el valor de Azufre de 10.82% por ser el único pico presentado fuera de lo normal.

CORRIENTE : 3

Tabla 7.3 Resumen de resultado de las pruebas de quemado (chimenea 421)

	Fecha	1ro de junio	17 de Mayo	8 de Junio	19 de Mayo	3 de Junio
	Nombre Prueba	Background		Fecha	Primer Spike	Segundo Spike
Flujo (Cond Std)	m3/min	4196	4863	4929	4966	5356
Material Part (PST)	mg/m3	12.75	15.69	17.37	15.07	14.36
Dioxinas y Furanos	g/hr	1.92E-05	2.8E-05	0.00E+00	1.54E-05	1.31E-05
Gases principales						
HCT	ppmv	8.68	6	8.41	10.1	8.78
SO ₂	ppmv	7.6	1.5	7.91	0	6
NH ₃	ppmv	13.9	15.3	27.05	11.7	17
CO	ppmv	572.8	207.6	1031	146.9	422
NO	ppmv	84.9	83.5	216.8	117	171
HCl	ppmv	0.75	1.5	1.1	1.7	0.62
NO ₂	ppmv	11.8	7.4	17	6.3	13.2
Cl ₂		1.09E-03	1.84E-03	2.37E-03	2.84E-03	0.97E-03
H ₂ O	% vol BS	9.99	14.21	10.52	10.76	9.57
CO ₂	% vol BS	19.72	21.6	21.16	21.7	19.42
O ₂	% vol BS	10.12	8.7	9.02	9.03	9.7
TCB	gr/hr	0.0717	0.0368		0.0511	0.1278

La tabla 7.3 presenta un resumen global de resultados en chimenea, cuyos valores corresponden a muestreos isocinéticos para el caso de partículas, flujo, humedad, CO₂ y Oxígeno; muestreo proporcional para el caso del cloro, muestreo isocinético bajo las indicaciones marcadas en el método 23 de EPA

para las dioxinas, furanos y TCB. El resto de parámetros corresponden a los promedios horarios del equipo de medición continua de chimenea, dentro de los cuales se encuentran los principales indicadores de la prueba: cloruro de hidrógeno, hidrocarburos totales y monóxido de carbono. En general todas las variables presentan el mismo orden de magnitud, lo cual es indicativo de que el uso de combustible alterno no introduce efectos adversos al proceso, ni propicia incremento en emisiones respecto a la condición normal.

CORRIENTE : 4

Tabla 7.4 Resumen de Resultados de las pruebas de Quemado (Clinker)

	Fecha	1ro de Junio	17 de Mayo	8 de Junio	19 de Mayo	3 de Junio
	Nombre Prueba	Background	Primer Alterno	Segundo Alterno	Primer Spike	Segundo Spike
P. por Ignición	(%) W	0	0.12	0.04	0.14	0.36
SiO ₂	(%) W	22.1	21.47	21.67	21.55	22
Al ₂ O ₃	(%) W	4.71	4.66	4.99	4.91	4.6
Fe ₂ O ₃	(%) W	2.99	3.48	3.23	3.55	3.24
CaO	(%)W					
MgO	(%)W	1.58	1.5	1.64	1.52	1.55
K ₂ O	(%)W	0.84	0.94	0.92	1.06	0.83
Na ₂ O	(%)W	0.8	0.42	0.59	0.42	0.61
Res. insoluble		0.05	0.11	0.9	0.09	0.07
CaO Libre		2.7	0.8	0.12	0.9	1.3
Cloro	ppm	<60	<60	<60	130	<60
PCB's		<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
Pesticidas	ppm	<0.176	<0.176	<0.176	<0.176	<0.176
Semivolátiles	ppb	161.3	446.2	0.75	2633.45	24.95
Azufre	(%) W	0.921	0.34	0.934	0.47	0.731
Arsénico	ppm	1.8	2.2	16.4	13.4	2.9
Bario	ppm	96.5	70.6	83.7	79.6	96.9
Cadmio	ppm	0.49	0.34	0.86	0.6	0.49

... Continuación Tabla 7.4 Resumen de Resultados de las pruebas de Quemado (Clinker)

	Fecha	1ro de Junio	17 de Mayo	8 de Junio	19 de Mayo	3 de Junio
	Nombre Prueba	Background	Primer Alterno	Segundo Alterno	Primer Spike	Segundo Spike
Piomo	ppm	<0.04	<0.04	<0.04	<0.04	<0.04
Mercurio	ppm	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001
Selenio	ppm	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
Plata	ppm	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
Cromo	ppm	13.5	13.3	17	14.6	20.5
N2 total	(%) W	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Niquel	ppm	7.3	7.3	nr	nr	11.3
Sulfatos	(%as S)	0.998	0.16	0.003	0.18	0.0165
Sulfitos	%	0.82	0.45	0.93	0.72	0.71
H ₂ O	(%) W	<0.02	15.7	nr	16.6	<0.2
Zinc	ppm	29	26.5	45	27.7	34
Dioxinas	ppm	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
Furanos	ppm	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001

En la tabla 7.4 se presentan los resultados analíticos del clinker, realizados durante las pruebas. En cuanto a la mineralogía no representa prácticamente ninguna variación en su composición, del mismo modo los metales pesados analizados son del mismo rango en todas las pruebas a excepción de la prueba del 8 de Junio que presenta un pico alto de Arsénico sin relación con el contenido de este elemento en las otras corrientes, incluyendo el crudo de la tabla 7.5. Esto es indicativo de que el clinker no altera su composición, y por consecuencia sus propiedades prevalecen tal cual.

CORRIENTE : 5

Tabla 7.5 Resumen de resultado de las pruebas de quemado (Crudo)

	Fecha	1ro de Junio	17 de Mayo	8 de Junio	19 de Mayo	3 de Junio
	Nombre prueba	Background	Primer alterno	Segundo Alterno	Primer Spike	Segundo Spike
Pérdida por Ignición	(%) W	34.9	35.1	35.05	35.00	34.96
SiO ₂	(%) W	14.72	14.04	14.05	14.16	14.43
Al ₂ O ₃	(%) W	3.11	3.28	3.09	3.33	3.03
Fe ₂ O ₃	(%) W	1.84	2.18	2.15	2.25	2.06
CaO	(%) W	43.38	42.97	42.86	42.59	43.35
MgO	(%) W	1.07	1.05	1.18	1.03	1.06
K ₂ O	(%) W	0.51	0.62	0.6	0.63	0.52
CaCO ₃	%	78	78	77.8	77.8	78.3
Cloro	ppm	70	104	114	70	98
PCB's	ppm	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
Azufre	(%) W	0.256		0.247	0.033	0.284
Arsénico	ppm	0.17	2.0	2.2	8.7	2.2
Bario	ppm	51.7	41.0	30.9	40.2	53.5
Cadmio	ppm	0.51	0.24	0.56	0.63	0.37
Plomo	ppm	<0.04	<0.04	<0.04	<0.04	<0.04
Mercurio	ppm	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001
Selenio	ppm	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
Plata	ppm	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
Cromo	ppm	3	5.8	4.6	4.4	4.8
Niquel	ppm	4.5	4.13	5.56	ND	4.5
Zinc	ppm	26	25.5	12	31.2	28
Sulfatos	% as S		0.016	0.0253	0.017	0.0252
Sulfitos	(%)		0.15	0.22	0.034	0.22
H ₂ O	(%) W		0.39	0.2	0.22	<0.2
Dioxinas	ppm		0.001	<0.001	<0.001	<0.001
Furanos	ppm		0.001	<0.001	<0.001	<0.001

En la tabla 7.5 se muestran los resultados analíticos del crudo, que aunque no fueron requeridos en el oficio de autorización, se realizaron a fin de establecer la referencia e información complementaria para balance.

Tabla 7.6 Resultados de aire ambiente con monitoreo continuo

Resultados de aire ambiente con monitoreo continuo										
Comparación con y sin combustible alterno										
Fecha	Dióxido de Azufre			Dióxido de Nitrógeno			Cloruro de Hidrógeno			
	Media	Máximo	Norma(1)	Media	Máxima	Norma(2)	Media	Máxima	Canadá	Alemania
Sin Combustible Alterno										
1,2/05/94	7.75	23.60	340.00	25.70	106.72	395.00	59.45	129.65	40.00	700.00
3,4/05/94	14.32	37.08	340.00	42.29	106.41	395.00	65.45	153.20	40.00	700.00
9,10/05/94	7.94	22.49	340.00	19.92	49.47	395.00	64.40	108.16	40.00	700.00
11,12/05	5.97	24.25	340.00	22.80	63.47	395.00	75.72	102.48	40.00	700.00
13,14/05	6.06	15.83	340.00	23.04	84.94	395.00	82.16	121.6	40.00	700.00
16,16/05	6.20	22.31	340.00	19.84	47.44	395.00	80.82	131.97	40.00	70.00
06,07/06	6.77	17.89	340.00	18.07	44.47	395.00	66.63	262.80	40.00	700.00
con Combustible Alterno										
17,18/05	5.19	18.91	340.00	20.79	48.94	395.00	98.40	137.03	40.00	700.00
19,20/05	2.81	6.96	340.00	19.69	48.05	395.00	90.13	125.60	40.00	700.00
21,22/05	2.45	6.92	340.00	22.66	46.15	395.00	81.25	104.30	40.00	700.00
23,24/05	5.54	30.42	340.00	22.59	49.11	395.00	77.72	176.60	40.00	700.00
31,01/05	6.55	20.14	340.00	19.84	36.05	395.00	124.05	231.40	40.00	700.00
02,03/08	10.5	27.68	340.00	20.03	45.11	395.00	136.17	199.70	40.00	700.00
08/08	5.68	13.21	340.00	22.47	44.01	395.00	50.01	172.93	40.00	700.00

(1) Norma Oficial Mexicana NOM-022-SSA1-1993

(2) Norma Oficial Mexicana NOM-023-SSA1-1993

En la Tabla 7.6 se presenta el resumen de resultados de varios días del monitoreo continuo de aire ambiente sin el uso de combustible alterno y con uso

del mismo, los datos fueron extraídos del sistema opsis y son representativos de toda la base de datos generada durante el periodo de pruebas.

Los datos promedio indicados en la tabla corresponde a períodos de 48 hrs., mientras que los indicados como máximo, indican el promedio máximo registrado en una hora de cada período.

Para el caso de bióxido de azufre el valor comparativo es la media, sin embargo, aún los máximos horarios no rebasan el criterio o norma de calidad de aire.

Para el uso del dióxido de nitrógeno el valor comparativo es la columna de máxima, observándose que todos los valores se encuentran por abajo del límite que marca la norma.

Para el cloruro de hidrógeno no hay norma o criterio nacional establecido, se tomaron como marco de referencia dos criterios, uno de Canadá y otro de Alemania, con períodos cortos de exposición 1/2 hr, de los cuales son comparativos con los máximos horarios. Lo que se infiere es que los valores medios se encuentran dentro del rango de los criterios de calidad de aire y por consiguiente no representan ningún problema. Por otro lado el orden de magnitud con o sin combustible alterno es prácticamente el mismo.

Cabe mencionar que el límite de detección del sistema opsis para el HCl es de 100 ug/m³ por lo que los valores resultantes deben considerarse del "orden de" en el límite inferior del aparato.

Tabla 7.7 Resultados aire ambiente, muestreos no continuos
Promedios

ESTACIÓN SALTILLO						
Determinación	Unidades	Prueba de Background	Pruebas con Alternativo	Pruebas con Spike	Norma Valor	Norma Tiempo
PST	ug/m3	4.9941	549.795	435.8	260	24 hrs.
Monóxido de Carbono	ppm	0.026	1.275	1.145	11	8 hrs.
Bióxido de Nitrógeno	ppm	0.01387	0.188	0.0156	0.21	1 hr.
Bióxido de azufre	ppm	0.048	0.01	0.037	0.13	24 hrs
Cloro	ppm	4.20×10^{-3}	1.368×10^{-3}	5.06×10^{-3}		
Cloruro de hidrógeno	ppm	0	4.244×10^{-6}	0		
Dirección del viento	ppm	NNE	NE-NW	NE		
Velocidad del viento	ppm	4.02-7.43	3.5-7.86	3.2-7.86		

... Continuación Tabla 7.7 Resultados aire ambiente, muestreos no continuos

ESTACIÓN MONTERREY						
PST	ug/m3	27.84	97.26	84.875	260	24 hrs.
Monóxido de Carbono	ppm	0.28	1.68	0.985	11	8 hrs
Bióxido de Nitrógeno	ppm	0	0.0102	0.01349	0.21	1 hr.
Bióxido de azufre	ppm	0.001	0.0116	0.03	0.13	24 hrs.
Cloro	ppm	0	2.697X(10) ⁻³			
Cloruro de hidrógeno	ppm	0	0			
Dirección del viento		NE	NE-NW			
Velocidad del viento		4.02-7.43	3.5-7.86			

En la tabla 7.7 se indica el resumen de resultados de PST, CO y Cloro así como de bióxidos de azufre y de Nitrógeno realizado por métodos puntuales y no continuos.

Todas las variables son del mismo orden de magnitud, lo que indica que no se introduce un factor de cambio relevante para el ambiente con el uso de combustible alterno.

Los valores de PST están por encima de la norma por la influencia del paso de camiones con material en la cercanía de la estación Saltillo y de la zona de manejo de materias primas a granel cuya influencia se reflejó en los monitoreos. Dada la baja emisión de partículas en chimenea (tabla 7.3), se infiere que no

contribuye de forma importante en los valores registrados, y por consiguiente no guardan relación alguna con las pruebas.

Por otra parte, la estación de monitoreo se ubico a distancia considerable del límite de propiedad en la dirección de vientos dominantes y dentro del terreno propiedad de la empresa, por lo que los resultados de monitoreo, de los gases representan los máximos valores esperados por la influencia de la pluma, dado que la selección del área del monitoreo se realizó bajo la técnica de "fuente orientada", por consiguiente la concentración en cualquier otro punto será menor necesariamente.

7.3. Análisis de Resultados Analíticos

7.3.1. Eficiencia de destrucción

En las pruebas denominadas de Spike se adicionó cantidad conocida del 1, 2, 4 Triclorobenceno utilizado como trazador, en base a los resultados analíticos e información del proceso, se determinó la eficiencia de destrucción indicada en la tabla 7.8.

La eficiencia de destrucción fue superior al 99.99% a pesar de que el TCB es un componente de difícil destrucción.

Tales resultados indican que el sistema de clinkerización es capaz de destruir todos aquellos componentes de estabilidad térmica igual o inferior al TCB, por ejemplo todas las sustancias de los otros grupos (clase 2 a clase 7) así como otras sustancias del propio grupo 1.

Tabla 7.8 Eficiencia de destrucción de 1,2,4 Triclorobenceno

	Fecha	Primer Spike 19 Mayo	Segundo Spike 3 Junio
Emisión	unid		
Masa Colectada	ug	0.61	1.49
Volumen	m3	3.5538	3.772
Muestreado STD			
Concentración	ug/m3	0.1716	0.3950
Flujo en chimenea	m3/min	4966	5391
Emisión TCB	g/hr	0.0511	0.1278
Entrada combustible alternativo	ppm	15757	16000
Concentración de TCB			
Flujo de alternativo	LPH	900	2700
Entrada TCB	g/hr	14,181	43,200
Eficiencia de destrucción		99.9996%	99.9997%

7.3.2. Eficiencia de remoción

En la tabla 7.9 se muestra el cálculo de la eficiencia de remoción del HCl generado durante la combustión de los orgánicos del combustible o de las propias materias primas del clinker.

Tabla 7.9 Eficiencia de Remoción de Cloruros

	Fecha	Background 1o Junio	Primer Alterno 17 Mayo	Segundo Alterno 8 Junio	Primer Spike 19 Mayo	Segundo Spike
Entradas						
Combustoleo						
Flujo	LPM	170	178.8	173	180.5	176.2
Cloruros	ppm	<60	<60	184	177	154
Cl en combustoleo	Kg/hr	0.61	0.64	1.91	1.92	1.63
Comb. Alterno						
Flujo	LPM	0	12	46	14.9	44.9
Cloruros	ppm	0	<60	455	8110	8227
Cl en Alterno	Kg/hr	0	0.04	1.26	7.25	22.16
Crudo						
Alimentación	TPH	186	184	200	198	200
Cloruros	ppm	140	210	229	140	196
Cl en crudo	Kg/hr	26.04	40.74	45.80	27.72	39.20
Total Cl entrada	Kg/hr	26.65	41.43	48.97	36.89	62.99
Concentración	mg/m3	0.0064	0.0059	0.0085	0.0307	0.0289
Flujo de Chimenea	m3/min BH	4965	4863	5042	4966	5391
Emisión de Cl (MAS)	Kg/hr	0.0025	0.0017	0.0026	0.0091	0.0093

Eficiencia de Remoción	99.99%	99.996%	99.99%	99.98%	99.99%
---------------------------------------	---------------	----------------	---------------	---------------	---------------

Promedios	99.99%	99.995%	99.98%
-----------	--------	---------	--------

Emisión de HCl (CEM)	ppm	0.75	1.5	1.1	1.7	0.52
Emisión de Cl	Kg/hr	0.32	0.64	0.48	0.73	0.24

Eficiencia de Remoción	98.78%	98.47%	99.01%	98.01%	99.61%
------------------------------	--------	--------	--------	--------	--------

Promedios	98.78%	98.741%	98.81%
-----------	--------	---------	--------

Las eficiencias con la primera referencia son superiores al 99.60% independientemente del tipo de prueba de quemado realizada o a la carga total de cloro alimentado al sistema, siendo la concentración de cloruros en chimenea del mismo orden.

Con la segunda referencia la eficiencia varía entre el 98.01% al 99.61% presentándose estos dos extremos en las dos pruebas de spike.

Por consiguiente y conforme a tales resultados se infiere que el sistema es capaz de asimilar hasta el orden 99% del HCl generado en el proceso durante la quema de combustible alterno.

El orden de concentración de HCl en chimenea es indicativo de la total destrucción de los orgánicos, lo que se corrobora con la alta eficiencia de destrucción (tabla 7.8), así como de la NO FORMACIÓN de dioxinas o furanos, tal como se indica en la tabla 7.10.

7.3.3. Dioxinas y Furanos

En la tabla 7.10 se muestra la emisión detectada en la chimenea en cuanto a las dioxinas y furanos totales. Por la magnitud de los resultados se demuestra la tendencia a cero de la presencia de tales componentes en el sistema, pues la concentración detectada en el efluente gaseoso es inferior a un nanogramo, lo que es un reto para su detección por cualquier tecnología y analista entrenado. Por tal razón se interpreta la NO FORMACIÓN de los mismos en el proceso de quemado, ya que en las corrientes de entrada tampoco se detectó su presencia. Lo anterior es conforme a lo esperado con los elevados valores de eficiencia de la destrucción y la baja concentración de HCl en chimenea y la elevada eficiencia de remoción o asimilación del sistema.

Tabla 7.10 Emisiones de Dioxinas y Furanos

	Fecha	Prueba de Background to de Junio	Primer Alterno 17 de Mayo	Segundo Alterno 8 de Junio	Primer Spike 19 de Mayo	Segundo Spike 3 de Junio
Triclorobenceno	ug	0.78	0.4	1.3	0.61	1.49
Dioxinas y Furanos	ug	0.000207	0.00031	0.00040	0.000166	0.000141
Standard BH	m3	3.214	3.1675	3.4912	3.5538	3.772
Triclorobenceno	ug/m3	0.243	0.126	0.239	0.172	0.395
Dioxinas y Furanos	ug/m3	0.00006	0.00010	0.00012	0.00005	0.00004
Standard	m3/min	4665	4863	5042	4966	5391
Emisión						
Triclorobenceno	g/hr	0.072	0.037	0.113	0.051	0.128
Dioxinas y Furanos	g/hr	0.0000192	0.0000287	0.0000371	0.0000154	0.0000131

El orden de resultados tanto de Dioxinas, Furanos y TCB, solo indican su tendencia a cero por alcances de los límites de detección de los métodos de análisis y muestreo.

Tabla 7.11 Condiciones de Operación

	Background 1o Junio	Primer Alterno 17 Mayo	Segundo Alterno 8 Junio	Primer Spike 19 Mayo	Segundo Spike 3 Junio
Temperatura del Horno	1069	1183	1228	1167	1165
Temperatura enfriador	1069	1121	1155	1112	1128
Temperatura					
Salida crudo etapa 1	266	277	281	272	280
Salida crudo etapa 2	466	474	476	468	473
Salida crudo etapa 3	596	600	597	596	594
Salida crudo etapa 4	711	714	713	711	710
Salida de crudo etapa 5	807	805	807	805	805
Salida de crudo etapa 6	822	836	832	836	829
Salida de gases etapa 1	295	203	302	295	299
Salida de gases etapa 2	435	439	450	446	452

... Continuación Tabla 7.11 Condiciones de Operación

	Background 1o Junio	Primer Alterno 17 Mayo	Segundo Alterno 8 Junio	Primer Spike 19 Mayo	Segundo Spike 3 Junio
Salida de gases etapa 3	588	605	600	600	560
Salida de gases etapa 4	706	717	714	714	710
Salida de gases etapa 5	780	798	799	795	797
Salida de gases etapa 6	849	855	855	858	850
Salida de gases Horno	858	875	872	875	873
Gases salida precalcinador					
O ₂	0.87	0.8	1.49	0.8	1.68
CO	0.47	0.16	0.45	0.22	0.34
Alterno (lpm)	0	12	48	14.9	44.9
HR	20	59	28	57	45
Temp amb.	29	22	31	22	26
% de sustitución (calor)	0	5.8	19.45	7.17	18.72

En la tabla 7.11 se indican las condiciones promedio en que se realizaron las pruebas de quemado, salvo el porcentaje de sustitución, ninguna variable presenta diferencia relevante en el proceso, lo que es indicativo de la no afectación de la dinámica del mismo. Esto se refleja a lo largo de todos los resultados de las pruebas de quemado, incluyendo los de chimenea, la cual representa la interfase entre el proceso y el medio ambiente, por lo que aquí se hace un análisis de las variables más relevantes, trazadoras de la eficiencia del quemado y del posible impacto sobre el ambiente.

7.3.4. Emisiones en chimenea

◆ Monóxido de Carbono

En la tabla 7.12 se muestran los resultados promedio horarios de cinco días con uso de alterno, tomados como referencia para el análisis y como fuente de información los reportes del CEM.

El CO se incrementó ligeramente a un promedio del orden de 316.8 ppm hasta 368.3 ppm en los días en que no se usó el combustible alterno, siendo por consiguiente del mismo orden de magnitud, los picos presentados con y sin alterno no son una condición normal del proceso como lo indica el resto de datos.

Esto es indicativo que no hay diferencia relevante entre la operación con o sin combustible alterno.

Tabla 7.12 Reporte del equipo de monitoreo continuo (CEM)

Monóxido de carbono		
Hora	Sin alterno	Con alterno
0:00	203.3	261.3
1:00	298.9	254.7
2:00	493.1	238.6
3:00	391.5	210.0
4:00	398.7	274.2
5:00	431.3	323.0
6:00	395.2	284.2
7:00	352.2	325.4
8:00	387.7	417.3
9:00	327.4	604.6
10:00	325.5	360.7
11:00	294.8	412.9
12:00	236.4	376.5

... Continuación Tabla 7.12 Reporte del equipo de monitoreo continuo (CEM)

Monóxido de carbono

Hora	Sin alterno	Con alterno
13:00	297.2	415.8
14:00	381.5	348.9
15:00	264.6	333.8
16:00	235.7	411.8
17:00	254.4	492.0
18:00	259.3	450.7
19:00	250.8	415.9
20:00	282.7	403.6
21:00	257.3	415.8
22:00	260.7	444.0
23:00	261.8	363.2
Prom.	316.8	368.3

◆ Hidrocarburos Totales

En la tabla 7.13, se muestran los resultados de hidrocarburos totales en chimenea, expresados como totales en base seca y al 7% de O₂, existe un ligero incremento con el uso del combustible alterno pero alejado aún del estándar de U.S.A. tomado como referencia de 20 ppmv.

Esto ilustra la capacidad del sistema de quemar con alta eficiencia todos los hidrocarburos, ratificando su poder de destrucción de los residuales.

Tabla 7.13 Reporte del equipo de monitoreo continuo (CEM)

Hidrocarburos totales (ppmv)

Hora	Sin alterno	Con alterno
0:00	6.9	9.6
1:00	6.9	9.5
2:00	6.8	10.6
3:00	6.4	9.4
4:00	6.7	10.6
5:00	6.8	9.6
6:00	6.9	9.7
7:00	7.5	9.5
8:00	7.7	9.9
9:00	8.1	12.8
10:00	7.5	12.0
11:00	7.7	11.8
12:00	7.6	11.7
13:00	9.8	12.4
14:00	9.9	12.6
15:00	9.2	12.6
16:00	8.8	12.9
17:00	9.6	12.8
18:00	9.5	13.0
19:00	9.5	12.2
20:00	8.9	12.5
21:00	9.4	13.0
22:00	9.1	14.2
23:00	8.9	14.2
Prom.	8.2	11.6

◆ **Cloruro de Hidrógeno**

En la tabla 7.14, se presenta el comportamiento del HCl con y sin combustible alternativo para cinco días incluidos los días de corridas completas y ocho días sin uso de combustible alternativo.

Tabla 7.14 Reporte del equipo de monitoreo continuo (CEM)

Cloruro de hidrógeno (ppmv)

Hora	Sin alternativo	Con alternativo
0:00	1.0	1.6
1:00	1.0	1.6
2:00	0.9	1.6
3:00	0.9	1.5
4:00	0.9	1.6
5:00	1.0	1.5
6:00	1.0	1.5
7:00	0.9	1.8
8:00	1.1	1.6
9:00	1.5	1.7
10:00	1.4	1.8
11:00	1.6	2.1
12:00	1.4	1.8
13:00	1.0	1.8
14:00	0.8	1.7
15:00	0.9	1.8
16:00	1.0	1.8
17:00	1.0	1.9
18:00	1.0	1.9
19:00	1.1	1.9
20:00	1.1	1.9
21:00	1.1	1.9
22:00	1.1	1.9
23:00	1.1	1.9
Prom.	1.1	1.8

7.3.5. Aire Ambiente

◆ Cloruro de Hidrógeno

El principal parámetro trazador de la operación de quemado de combustibles alternos en el HCl, el cual fue medido mediante un sistema de monitoreo continuo en la zona de máxima influencia de la pluma de chimenea, por lo que las concentraciones esperadas fuera de esta zona serán mucho menores a las registradas.

En la tabla 7.15 se muestra el comportamiento promedio horario que se tuvo durante diferentes días, siete días sin combustible alterno y siete con alterno. El comportamiento es muy similar y del mismo orden de magnitud, todos los valores caen dentro del rango de criterios de calidad de aire tomados como referencia para periodos cortos de exposición correspondientes a Canadá y Alemania (otros países tienen valores intermedios).

Por consiguiente es claro que no se cambia ambientalmente la condición original de operación de la planta con la introducción del combustible alterno en el proceso de clinkerización.

Tabla 7.15 Resultados de HCl en aire ambiente

Resultados de HCl en aire ambiente				
	a/Alterno	c/Alterno	Criterio 1	Criterio 2
hora	Promedio	Promedio	Canadá	Alemania
1:00	33.86	27.09	40.00	700.00
2:00	32.77	26.53	40.00	700.00
3:00	32.39	26.74	40.00	700.00
4:00	61.81	59.64	40.00	700.00
5:00	66.39	65.25	40.00	700.00
6:00	41.35	66.16	40.00	700.00
7:00	92.11	80.31	40.00	700.00
8:00	79.20	67.96	40.00	700.00
9:00	79.09	71.26	40.00	700.00
10:00	72.12	76.79	40.00	700.00
11:00	69.60	64.05	40.00	700.00
12:00	72.03	66.21	40.00	700.00
13:00	71.13	65.11	40.00	700.00
14:00	82.58	73.63	40.00	700.00
15:00	62.30	68.05	40.00	700.00
16:00	59.00	57.18	40.00	700.00
17:00	80.99	72.93	40.00	700.00
18:00	83.54	60.66	40.00	700.00
19:00	83.66	59.86	40.00	700.00
20:00	55.42	51.35	40.00	700.00
21:00	55.20	50.86	40.00	700.00
22:00	54.76	49.07	40.00	700.00
23:00	60.44	49.24	40.00	700.00
24:00	57.98	50.22	40.00	700.00
Promedio	78.97	57.76	40.00	700.00

◆ Dióxidos de Azufre y Nitrógeno

El comportamiento de estos parámetros, se encontraron siempre dentro de los criterios de calidad de aire indicados por las correspondientes Normas Oficiales Mexicanas. Tanto los valores medios como los máximos se encuentran del mismo orden con y sin el uso del combustible alterno.

Capitulo 8

Conclusiones



8. Conclusiones

- a) Los hornos de cementos son ambientalmente seguro para la destrucción de componentes de estabilidad térmica similar o inferior al 1,2,4 Triclorobenceno, utilizado durante las pruebas como trazador de la eficiencia de destrucción, la cual fue superior al 99.9% .
- b) La eficiencia de remoción del cloruro de hidrógeno resultante de la destrucción térmica de los compuestos organoclorados es del orden de 99.9% lo que indica la capacidad del sistema de asimilar el componente como diversos cloruros que se integran al material procesado.
- c) En todas las corrientes de entrada estuvieron ausentes las dioxinas y los furanos, tablas 7.1, 7.2, 7.5; no obstante fueron determinadas en chimenea a fin de verificar su posible formación dentro del sistema; los resultados muestran la ausencia de tales componentes en la chimenea, tabla 7.10., pues el orden registrado es tan solo entre los 10 y los 30 microgramos por hora, lo que se interpreta como ausencia o tendencia a cero de la emisión, pues tales valores representan una concentración inferior a un nanogramo por metro cúbico en la chimenea la cual es del orden de los límites de detección del muestreo y análisis.
- d) Los resultados como: la ausencia de dioxinas y furanos en chimenea; la elevada eficiencia de destrucción mostrada por el sistema; la muy baja concentración detectada de cloro molecular, en chimenea, tabla 7.3, muestran en conjunto que el principal indicador de la eficiencia de destrucción y la no formación de dioxinas y furanos en el Sistema es el HCl.
- e) Los hidrocarburos no quemados en chimenea siempre estuvieron por abajo de los 20 ppmv reportados como propano, tabla 7.3, tal como lo exige la regulación de U.S.A.

- f) El monóxido de carbono se incrementó ligeramente en promedio horario, pero presentando el mismo orden de magnitud con y sin combustible alterno por lo que no resulta diferencia relevante entre una condición y otra. No obstante se presentaron picos instantáneos mayores a 1000 ppmv durante las pruebas, como una condición anormal, lo cual se reflejó en los picos de los promedios con valores del orden de 500-600 ppm.
- g) Las emisiones de partículas en chimenea conforme a las evaluaciones con y sin alterno estuvieron del orden de los 5 Kg/hr, tabla 7.3 estando dentro de normas estadounidense y nacional (NOM-CCAT-002-ECOL/1993).
- h) Todos los parámetros gaseosos medidos en el aire ambiente se encuentran dentro del rango de criterios de calidad del aire nacionales y extranjeros, aún tomando los valores más altos registrados, dado que fueron medidos en la zona de máxima influencia instantánea de la pluma de chimenea, dentro de los límites del predio, la concentración fuera de tales límites será aún mucho menor. Ninguno de los parámetros registró cambio relevante respecto a la condición de fondo.

Capítulo 9 Bibliografía



9. Bibliografía

- 📖 Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente
- 📖 Diario Oficial de la Federación
- 📖 Gacetas Ecológicas

- 📖 Ing. W. Kreft "Reduction of operating cost in cement clinker burning by efficient use of energy and by using substitute and waste materials"
Refratechnik GmbH (1989), pag. 75-92

- 📖 Dr. H. D. Maury "Fuel from waste- A fuel for the cement industry"
Refratechnik GmbH (1989), pag. 93-115

- 📖 Irene Kim "Incinerators cement kilns face off"
Chemical engineering/april 1994, pag. 41-45

- 📖 Hany A. Makroum "Quantitative evaluation of waste recycling"
World Cement/feb 1995, pag. 49-52

- 📖 Dr. Alfonso García Gutiérrez " Manejo de residuos sólidos"
Ingeniería Ambiental, año 1 No. 4 Julio-Agosto/1988, pag. 6-9

- 📖 Douglas Smith, Allison L. Yuhas, Brian Magee Edited by Suzanne Shelley
"Incinerator Risk Assessments: Change is in the Air"
Chemical Engineering/June 1994

- 📖 Dr. Gustav Krogbeumker "Dioxin emissions associated with the use of secondary fuels in rotary cement kilns"
International Cement Review/ May 1994, pag 43-50

- 📖 Felix Müller "Aprovechamiento de combustibles alternativos - Actuación conjunta de las fábricas Suizas de cemento"
Holderbank News Ene-Feb/95, pag. 32-35

- ☞ J. Waltisberg/H. Nyffenegger "La medición de las emisiones de dióxido de azufre - (SO₂) y de óxido nítrico - (NO_x) en la industria del cemento"
Holderbank News Marzo-Abril/1987, pag. 35-43
- ☞ Michael Nisbet "A pivotal role for cement plants in industrial ecology"
The Cement Industry No.1 Technical Journal, Volumen 26 Number 5,
may 1995, pag. 51-56
- ☞ J. H. Kim "Energy reduction using a waste heat recovery and generating system"
World Cement/April 1995, pag. 73-76
- ☞ J. Waltisberg "Ensayos de fábrica sobre la influencia de las condiciones de las llamas en la formación de óxidos nítricos en el horno rotatorio de cemento"
Holderbank News Diciembre/1984, pag. 21-25
- ☞ Syverud, Arnulf Thomassess and Gautestad "Utilization of chipped car tyres for reducing NO_x emissions in a precalciner kiln"
World Cement/November 1994, pag. 39-43