



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

**ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD ECONÓMICA
PARA LA UTILIZACIÓN DE CARBÓN MINERAL
EN LA FABRICACIÓN DE CAL VIVA**

CLAUDIA LEONELA CALDERÓN AGUILAR
Asesorada por Ingeniero Jorge Benedicto Díaz Alonzo

Guatemala, septiembre 2005

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD ECONÓMICA
PARA LA UTILIZACIÓN DE CARBÓN MINERAL
EN LA FABRICACIÓN DE CAL VIVA

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

CLAUDIA LEONELA CALDERÓN AGUILAR

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
INGENIERA QUÍMICA

GUATEMALA, SEPTIEMBRE 2005

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	
VOCAL II	Lic. Amahán Sánchez Alvarez
VOCAL III	Ing. Julio David Galicia Celada
VOCAL IV	Br. Kenneth Issur Estrada Ruiz
VOCAL V	Br. Elisa Yazminda Vides Leiva
SECRETARIO	Inga. Marcia Ivonne Véliz Vargas

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
EXAMINADOR	Ing. Williams Guillermo Álvarez Mejía
EXAMINADOR	Ing. Rodolfo Francisco Espinoza Smith
EXAMINADOR	Ing. Cesar Alfonso García Guerra
SECRETARIA	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD ECONÓMICA PARA LA UTILIZACIÓN DE CARBÓN MINERAL EN LA FABRICACIÓN DE CAL VIVA,

tema que me fuera asignado por la Dirección de Escuela de Ingeniería Química, con fecha 07 de junio 2005

CLAUDIA LEONELA CALDERÓN AGUILAR



Guatemala,
16 de agosto de 2005

Ingeniero
Julio Rivera
Director de Escuela de Ingeniería Química
Universidad de San Carlos de Guatemala

Ingeniero Rivera:

Por este medio le informo que he revisado el trabajo de graduación de la estudiante Claudia Leonela Calderón Aguilar, carnet 9517062, con el tema **"Estudio de prefactibilidad económica para la utilización de carbón mineral en la fabricación de cal viva"**, contando con mi asesoría y aprobación.

Sin otro particular, me despido.

Atentamente,

Ing. Jorge Díaz
Gerente Planta LP
Colegiado No. 537

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

Guatemala, 2 de septiembre de 2,005.

Ingeniero
Federico Salazar Rodríguez
Director Escuela Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería
Presente.

Estimado Ingeniero Salazar.

El motivo de la presente es para darle a conocer que he revisado el trabajo de Graduación, de la estudiante **Claudia Leonela Calderón Aguilar**, titulado: "ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD ECONÓMICA PARA LA UTILIZACIÓN DE CARBÓN MINERAL EN LA FABRICACIÓN DE CAL VIVA" lo he encontrado satisfactorio y por lo tanto le otorgo mi aprobación.

Agradeciéndole la atención que se sirva dar a la presente lo saluda.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS



Dr. Adolfo Gramajo Antonio
REVISOR

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

El Director de la Escuela de Ingeniería Química Ing. Federico Guillermo Salazar Rodríguez, después de conocer el dictamen del Asesor con el Visto Bueno del Jefe del Departamento al trabajo de de Graduación de la estudiante CLAUDIA LEONELA CALDERÓN AGUILAR titulado: "ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD ECONÓMICA PARA LA UTILIZACIÓN DE CARBÓN MINERAL EN LA FABRICACIÓN DE CAL VIVA", procede a la autorización del mismo.

Ing. Federico Salazar Rodríguez
DIRECTOR ESCUELA INGENIERIA QUIMICA



Guatemala, septiembre de 2,005

Universidad de San Carlos
De Guatemala

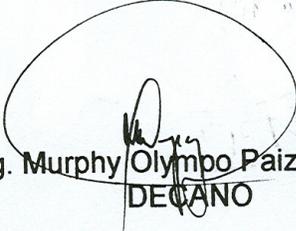


Facultad de Ingeniería
Decanato
Tels. 24769579 Exts. 101-102-114
Fax: 24760365

Ref. DTG. 395-2005.

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al trabajo de graduación titulado: **ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD ECONÓMICA PARA LA UTILIZACIÓN DE CARBÓN MINERAL EN LA FABRICACIÓN DE CAL VIVA**, presentado por la estudiante universitaria **Claudia Leonela Calderón Aguila** procede a la autorización para la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.


Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
DECANO

Guatemala, Septiembre 14 de 2,005

/macm

AGRADECIMIENTO

A:

Dios,

Por brindarme salud y vida, para poder culminar esta meta.

Mis padres,

Mario Calderón y Thelma de Calderón, por todo el esfuerzo para sacar adelante a nuestra familia.

Mi esposo,

Marvyn Cerón, por brindarme apoyo durante todo el desarrollo de mi carrera profesional.

Ing. Jorge Díaz,

Por su asesoría.

Ing. Adolfo Gramajo,

Por su colaboración.

Ing. Juan Pablo Mazariegos,

Por su asesoría y apoyo incondicional.

A todas las personas que participaron directa o indirectamente en la elaboración del presente trabajo de graduación, sin su ayuda no hubiese sido posible, gracias.

DEDICATORIA

El presente trabajo está dedicado a:

Mi esposo: Marvyn por su paciencia, apoyo, compañía y amor. Gracias gordo!

Mis hijas: Danyel Andrea y Claudia Sofía.

Mis hermanos: Mario, María José, Luisa y Vivian.

Mis tíos y tías: Zoila, Bety, Sarbelio y Lorena.

Mis incondicionales amigos: Zuly, Liz, Carol, Lester y Monse.

Mis divertidos compañeros de trabajo: Rolando, Alejandra, Gaby, Erica, Aida, Cintia, Erwin y Cesar.

Las familias: Jiménez – Pérez, Marroquín – Marroquín, Aguilar – De León por abrirme las puertas de sus hogares.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V-VI
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN	XI
OBJETIVOS	XIII
HIPÓTESIS	XV
INTRODUCCIÓN	XVII

1. COMBUSTIBLES

1.1. Generalidades de los combustibles.....	1
1.2. Tipos de combustibles.....	2
1.2.1. Combustibles Sólidos.....	2
1.2.1.1. Carbón Mineral.....	2
1.2.1.1.1. Clasificación de los Carbones.....	2
1.2.1.1.1.1. Antracita.....	3
1.2.1.1.1.2. Lignito.....	3
1.2.1.1.1.3. Turba.....	3
1.2.1.1.2. Tipos de análisis químico para el carbón.....	3-4
1.2.1.2.1. Coque Inferior o Carbón pirolizado.....	4
1.2.1.2.2. Carbón Vegetal.....	4
1.2.1.2.3. Bagazo.....	4
1.2.1.2. Otros combustibles sólidos.....	4
1.2.1.2.2. Coque inferior o carbón pirolizado.....	4
1.2.1.2.3. Carbón vegetal	5
1.2.1.2.4. Bagazo.....	5

1.2.2. Petróleo.....	5
1.2.3. Combustibles Gaseosos.....	6
1.2.3.1 Gas Natural.....	6

2. SISTEMAS DE COMBUSTIBLES PARA HORNOS

2.1. Consideraciones generales.....	9
2.2. Tipos de hornos para la fabricación de cal viva.....	9
2.2.1. Hornos verticales.....	10
2.2.1.1. A contracorriente.....	10
2.2.1.2. De corriente paralela regenerativos.....	11
2.2.2. Horno rotativo largo.....	12
2.2.3. Horno largo rotativo con precalentador.....	14
2.3. Quemadores	
2.3.1. Consideraciones generales.....	16
2.3.2. Funciones de un quemador.....	17
2.3.3. Tipos de quemadores.....	17
2.3.3.1. Quemadores de carbón.....	17
2.3.3.2. Quemadores de gas.....	18
2.3.3.3. Quemadores de aceite.....	18
2.4 Clases de quemadores	18-25
2.4.1 Quemador de un flujo (un canal).....	18
2.4.2 Quemador combinado.....	20
2.4.3 Quemador de un flujo (dos canales).....	21-22
2.4.4 Quemador múltiple.....	23
2.5 Alimentación de carbón pulverizado al quemador.....	25-26
2.5.1 Diseño de la salida de la tolva.....	25
2.5.2 Transporte neumático al quemador.....	26
2.6 Sistemas de alimentación de carbón.....	28

3 ANÁLISIS ECONÓMICO DE QUEMADORES	
3.1 Costos para un quemador de carbón (un flujo).....	29
3.2 Costos para un quemador de aceite (un flujo).....	30
3.3 Costos para un quemador de carbón y aceite (flujo combinado).....	30
3.3.1 Sistema de secado y molienda.....	31
3.3.2 Sistema de transporte.....	31
3.4 Métodos tradicionales para medir la rentabilidad.....	33
3.4.1 Tasa de rendimiento.....	33
3.4.2 Período de recuperación.....	33
3.5 Cálculo de la mezcla ideal para la fabricación de cal viva.....	34
3.5.1 Evaluación del quemador combinado utilizando carbón y aceite	34-38
3.6 Discusión de resultados.....	39-41
4. PREPARACIÓN DEL CARBÓN	
4.1 Generalidades.....	43
4.1.1 Temperaturas dentro del sistema de molienda.....	43
4.1.2 Finura de la molienda.....	44
4.1.3 Secado del carbón.	45
4.2 Molinos para moler carbón.....	45
4.2.1 Molino de bolas.....	45-46
4.2.2 Molino vertical de rodillos.....	47
4.2.3 Trituradora giratoria.....	50
4.2.4 Trituradora tipo rodillo.....	50
5. ALMACENAMIENTO DE CARBÓN	
5.1 Generalidades.....	51-52
5.2 Pilas no compactadas.....	52-54
5.3 Pilas compactadas.....	54
5.4 Apilamiento de carbón en capas de premezclado.....	55-56

6. ASPECTOS DE SEGURIDAD	
6.1 Supervisión de pilas de carbón crudo.....	57
6.2 Medidas contra incendios.....	57
6.3 Control de incendios en silos.....	58
6.4 Medidas de seguridad para explosiones de polvo.....	59
6.4.1. Inercia.....	59
6.4.2. Descarga de la presión.....	60
6.4.3. Supresión automática de explosiones.....	61
CONCLUSIONES.....	63
RECOMENDACIONES.....	65
BIBLIOGRAFÍA.....	67

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Funcionamiento de un horno vertical	11
2.	Funcionamiento de un horno largo rotativo para fabricar cal viva	15
3.	Quemador de Aceite con válvula de aguja (un flujo)	19
4.	Quemador de combinado de tres canales (flujo combinado)	20
5.	Quemador de carbón con tubos concéntricos (un flujo)	22
6.	Quemador de gas	24
7.	Silo para almacenamiento de carbón molido	27
8.	Mezcla de carbón/bunker vs. Costos por energía de la mezcla	36
9.	Energía producida de la mezcla carbón/bunker vs. Costos de la mezcla	37
10.	Costo de fabricación de cal viva vs. Costo por tonelada cal viva con mezclas de carbon/bunker	38
11.	Fineza recomendada para carbón mineral	44
12.	Vista seccional de un molino de bolas	46
13.	Molino vertical de Rodillos	48

TABLAS

I.	Poder calórico para distintas clases de combustibles	7
II.	Resumen de costos de inversión para tres tipos de quemadores y equipos auxiliares necesarios para su funcionamiento	32
III.	Resumen del análisis sobre el tiempo de recuperación para la inversión inicial de un quemador par la fabricación de cal viva en un horno rotativo	34

IV. Costos para mezclas de carbón bunker con respecto a la energía que producen	35
V. Ventajas y desventajas de molinos verticales sobre horizontales	49
VI. Altura máxima para pilas no compactadas de carbón	53

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
%	Porcentaje
Btu/lb	Poder calorífico, entalpía (con respecto a la masa)
oC	Grados celcius
m/s	Metros por segundo
mm	Milímetros
Kg/m³	Kilogramo por metro cúbico
Bar	Presión
cm	Centímetro
Kcal	Kilocalorías
Kg	Kilogramo
CO₂	Dióxido de carbono

GLOSARIO

Coque	Es el material infusible, sólido y celular que queda después de la carbonización del carbón, alquitrán, residuos de petróleo y otros materiales carbónicos.
Clinker	Es el resultado de la reacción química que sufren las materias primas para la fabricación de cemento durante su cocción dentro de hornos rotatorios.
Cal viva	Reacción química que sufre el carbonato de calcio al ser sometida al efecto del calor.
NOx	Óxidos de nitrógeno, se obtienen en el proceso de combustión.
Hollín	Aglomeración de moléculas hidrocarbonadas, que se obtiene como producto de desecho en la combustión.

RESUMEN

El presente trabajo de graduación es un estudio económico que evalúa la prefactibilidad para utilizar carbón mineral en el proceso de fabricación de cal viva en un horno rotativo, ubicado en Planta La Pedrera, zona 6, departamento de Guatemala, dicho estudio se realizó con el propósito de disminuir los costos de operación y para verificar el tiempo en que dicha inversión se recupera.

Se evaluaron los diferentes tipos de molienda y combustión para elegir el óptimo, tomando en cuenta: capacidad para manejar diferentes materiales, eficiencia y rendimiento.

Se analizó el tiempo de recuperación de la inversión para tres tipos de quemadores, el primero es capaz de quemar combustibles sólidos, el segundo combustibles combinados sólido – líquido y el tercero solo combustibles líquidos.

El estudio indica, primero, que el equipo mejor para la molienda de carbón es un molino de rodillos sin embargo en la planta existen diferentes tipos de molido de bolas que pueden utilizarse para realizar dicha molienda y de esta manera se ahorra el costo de inversión de este equipo. Segundo, el equipo óptimo para la combustión es el quemador combinado, aceite – carbón, ya que, proporciona un tiempo de recuperación de la inversión es menor que el de los otros, indicando la factibilidad del proyecto.

OBJETIVOS

- **General**

Realizar un estudio de prefactibilidad económica para la utilización de carbón mineral como combustible en el proceso de fabricación de cal viva en un horno horizontal de tipo rotativo.

- **Específicos**

1. Determinar el sistema de molienda óptimo.
2. Determinar el sistema de combustión óptimo para un horno horizontal tipo rotativo.
3. Determinar la magnitud de las modificaciones necesarias en la planta La Pedrera para instalar un sistema de combustión de carbón mineral para un horno rotativo.

HIPÓTESIS

Es factible utilizar carbón mineral para el proceso de fabricación de cal viva en un horno largo rotativo con un tiempo de recuperación de la inversión inicial menor o igual a tres años, tiempo establecido como máximo en las normas internas de Cementos Progreso, S.A. Y los cambios en los equipos de la planta la Pedrera para manipular el carbón mineral como combustible de dicho proceso no sean más que ajustes y/o modificaciones a los ya existentes.

INTRODUCCIÓN

Actualmente, en Guatemala, el petróleo y sus derivados, el búnker es utilizado en la combustión para: fabricación de cemento, cal, vidrio y en cualquier proceso que requiera la conversión de combustible en energía por medio de oxígeno.

Sin embargo, en las últimas décadas ha surgido un creciente interés por el reemplazo de petróleo por el uso de carbón como combustible debido al aumento de los precios del petróleo desde la década de los setentas hasta la fecha. Sin embargo, la utilización de este combustible implica un amplio estudio económico para identificar las alternativas que permitan fortalecer la conveniencia del proyecto y su rentabilidad.

Es por ello que, el presente estudio evalúa la pre factibilidad de utilizar carbón mineral como combustible para la fabricación de cal viva en un horno rotativo, tomando en cuenta cambios que necesite el proceso y las propias instalaciones de la planta La Pedrera ubicada en la zona 6 ciudad de Guatemala.

1. COMBUSTIBLES

1.1 Generalidades

Los combustibles se pueden clasificar atendiendo a su estado de agregación en: combustibles sólidos, líquidos y gaseosos. Estos que fueron formados de plantas que vivieron en épocas muy remotas y en otros casos fueron transformados utilizando la tecnología del siglo XXI.

Dentro de los combustibles sólidos, solamente el carbón y su derivado el coque han alcanzado gran utilización para determinadas aplicaciones. Entre los combustibles líquidos sin duda el petróleo es el más importante, se compone de una mezcla compleja de hidrocarburos pesados casi sólidos (breas). Los gases naturales salen de la tierra y están compuestos principalmente por hidrocarburos ligeros tales como: metano y etano, y los gases obtenidos por la industria petrolera y química llamados hidrocarburos pesados como el butano, propano, etc.. Los gases se obtienen por medio de la destilación seca (pirogenación) o gasificación de los carbones naturales.

Los elementos fundamentales de un combustible son: carbono (C), hidrógeno (H) y el azufre (S) considerado como un cuerpo indeseable.

1.2 Tipos de combustibles

1.2.1 Combustibles sólidos

1.2.1.1 Carbón Mineral

El carbón se originó a partir de los restos en descomposición interrumpida de árboles, arbustos, helechos, musgos, lianas y otras formas de vida vegetal, que florecieron en lodazales y pantanos, hace muchos millones de años, durante periodos prolongados de clima húmedo y tropical y precipitaciones pluviales abundantes.

El carbón es una mezcla de carbono, hidrógeno, oxígeno, hidrocarburos volátiles, nitrógeno, azufre, agua y diferentes minerales que quedan como cenizas al quemarlo.

Si bien no hay una demarcación nítida entre las diversas etapas de esa evolución, generalmente se admiten las siguientes categorías: turba, lignitos, hullas y antracitas. También están los coques que se obtienen por des -gasificación de estos carbones naturales.

1.2.1.1.1 Clasificación de los combustibles sólidos

La comparación de los carbones se hace mejor basándose en su materia combustible, toda vez que su contenido de cenizas y humedad varíe considerablemente; veamos la siguiente clasificación:

1.2.1.1.1.1 Antracita

Es el carbón con mayor contenido de carbono y el máximo poder calorífico, es un carbón muy duro, posee un color negro lustroso (brillante) y menos del 8% de materias volátiles. Arde sin llama o con llamas muy cortas y azuladas. Este carbón es indicado cuando es una combustión sin

1.2.1.1.1.2 Lignito

Es considerado el carbón de peor calidad por sus poderes caloríficos y elevado contenido de humedad y cenizas. Tiene aspecto de madera y frecuentemente de arcilla. Están sujetos al riesgo de la combustión espontánea, solo son de interés para instalaciones que se encuentran en la boca de la mina.

1.2.1.1.1.3 Turba

Es el precursor del carbón y se formó mediante la acción bacteriana y química sobre los desechos de plantas. Tiene un alto contenido de carbono fijo y un alto índice de humedad y cenizas. Se utiliza desde hace siglos como combustible para fuegos abiertos. Recientemente con la ayuda de la tecnología se han fabricado briquetas de turba y lignito para quemarlas en hornos.

1.2.1.1.2 Tipos de análisis químicos para el carbón mineral

Los análisis químicos que usualmente se realizan son los siguientes:

- Análisis aproximado para la determinación de sustancias volátiles, humedad (total e higroscópica) y cenizas.
- Análisis último para la determinación de elementos tales como carbón, hidrógeno, azufre, nitrógeno y oxígeno.
- Análisis químico para la determinación de los elementos presentes en la ceniza de carbón.
- Análisis físico para la determinación del valor calorífico bruto, seguido del cálculo del valor neto basándose en la humedad higroscópica y el agua de combustión.

1.2.1.2 Otros combustibles sólidos

1.2.1.2.1 Coque inferior o carbón pirolizado:

Es el residuo no fusible ni aglomerado del tratamiento térmico de materiales carbonáceos sólidos a bajas temperaturas. Los valores de contenido de materia volátil y de azufre y los poderes caloríficos de los coques inferiores son más bajos y el contenido de cenizas más alto que en el carbón original.

1.2.1.2.2 Carbón vegetal

Es el residuo que queda después de la destilación destructiva de la madera. Absorbe humedad con facilidad y contiene de 10 a 15% de agua.

1.2.1.2.3 Bagazo

Es el residuo sólido que queda cuando se tritura la caña de azúcar mediante rodillos de presión. Suele contener de 40 a 50% de agua.

1.2.2 Petróleo

El petróleo o aceite crudo se extrae de pozos perforados a grandes profundidades en los estratos rocosos de la corteza terrestre. A pesar de que algunos compuestos de oxígeno, azufre y nitrógeno que se encuentran en el petróleo; éste contiene principalmente una mezcla de hidrocarburos los cuales se refinan mediante un proceso llamado destilación fraccionada para obtener productos útiles. Este proceso se basa en las volatilidades de los diferentes hidrocarburos que varían inversamente a sus masas moleculares.

Existen tres grandes categorías de petróleos crudos: los de **tipo parafínicos** compuestos por moléculas en las que el número de átomos de hidrógeno es siempre superior de dos unidades al doble del número de átomos de carbono, los de **tipo asfálticos** se caracterizan por las moléculas de naftenos que contienen exactamente el doble de átomos de hidrógeno que de carbono y **los de base mixta** que contienen hidrocarburos de ambos tipos.

La cifra más importante para el uso práctico del aceite crudo es la viscosidad, y es necesario compararla con la temperatura ya que son inversamente proporcionales.

1.2.3 Combustibles gaseosos

1.2.3.1 Gas natural

Es un gas combustible que se obtiene de rocas porosas del interior de la corteza terrestre y se encuentra mezclado con el petróleo crudo cerca de yacimientos del mismo. El gas natural se compone de hidrocarburos con muy bajo punto de ebullición, el metano es el principal constituyente sin embargo también pueden estar presentes aunque en muy bajas proporciones el etano, propano, pentano, hexano, heptano y octano.

El gas natural es un excelente combustible para los hornos cementeros; es limpio y requiere pocas instalaciones, e normalmente constante y fácil de controlar. Uno de los principales problemas que existe es cierto riesgo de explosión en el encendido y requiere precauciones especiales en el diseño de la planta.

Una ventaja es que el contenido de azufre es bajo, y es importante señalar que la temperatura de ignición es alta (600-700° C) razón por la cual hay que tener especial cuidado durante el calentamiento.

Tabla I. Poder calorífico para distintas clases de combustibles

No.	Clase de Combustible	Poder Calorífico (Kcal/Kg)
1	Antracita	9500 – 10000
2	Lignito	6300 – 8300
3	Turba	< 6300
4	Coque inferior o pirolizado	7100
5	Carbón mineral	5100 - 5500
6	Bagazo seco	8000 - 9000
7	Bunker tipo A	9200 – 9800
8	Aceite usado	8900 – 9000

2. SISTEMAS DE COMBUSTIÓN PARA HORNOS

2.1 Consideraciones generales de la combustión

La temperatura de la llama depende de la composición química del combustible y de la cantidad de exceso de aire que participa en la combustión. Es uno de los principales factores que debe controlarse en la combustión dentro de un horno. El control del perfil de la llama depende de los siguientes factores dominantes:

1. La temperatura del aire de combustión: este depende de una efectiva recuperación del calor del material quemado.
2. Cantidad óptima de exceso de aire (no necesariamente el mínimo teórico).
3. La velocidad de mezclado del combustible y el aire de combustión.
4. El tipo y la cantidad de combustible utilizado.

2.2 Tipos de hornos para fabricar cal viva

En la industria moderna se pueden encontrar varios tipos de hornos para la fabricación de cal viva, entre ellos mencionaremos algunos con sus características operacionales:

2.2.1 Hornos verticales

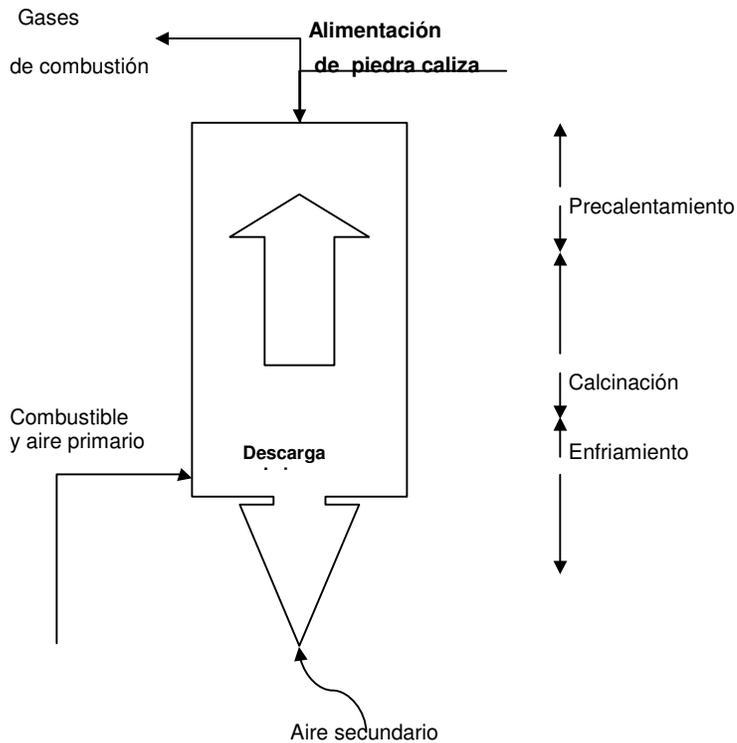
La teoría de calcinación ha demostrado que la manera más eficiente de producir cal de alta calidad es aplicar una cantidad considerable de calor al inicio de la calcinación, dado que la caliza se encuentra en forma de carbonatos y no se tendrá pérdida de calidad, mientras que al final del proceso de calcinación debe existir una disminución de la cantidad de calor a suministrar. Conociendo su mecanismo de transferencia de calor podemos analizar los hornos verticales. (Figura 1)

2.2.1.1 Hornos verticales a contracorriente

En estos hornos los gases calientes de combustión y el aire de enfriamiento ingresan por la parte baja del horno, zona que usualmente corresponde a la parte final de calcinación. Este proceso ocasiona que el producto final en la zona de calcinación se lleve por encima de la temperatura de calcinación de la piedra (800° C) obteniendo una cal sobre quemada, especialmente en aquellos puntos donde la distribución de los gases de combustión y el aire de enfriamiento no sea homogénea.

Otro fenómeno que se presenta en este tipo de hornos es la baja transferencia de calor del aire de combustión en la zona de enfriamiento; la entalpía de la cal limita la temperatura ocasionando que el calor sensible escape con las piedras de cal y por consiguiente un producto a la descarga del horno con una temperatura muy alta para las aplicaciones industriales de este producto .

Figura 1. Diagrama de operación de hornos verticales a contracorriente



2.2.1.2 Hornos verticales de corriente paralela regenerativos

En los hornos regenerativos, los gases calientes ingresan por la parte superior del horno en donde exista la mayor diferencia de temperatura con la piedra caliza. Los gases de combustión se hacen pasar por la zona de calcinación transfiriendo el calor a la piedra caliza de la zona de precalentamiento, el cual será utilizado cuando el proceso se revierta. Este fenómeno es precisamente lo que hace que los hornos regenerativos sean económicos en el consumo de energía térmica.

Otro parámetro a considerar es la posibilidad de seleccionar la cantidad de aire en exceso que se utiliza en la combustión debido a la relación que guarda con respecto a la longitud de la llama. Es decir una mayor cantidad de aire de combustión crea una llama más corta, y una cantidad menor de aire provoca una llama más larga.

La característica principal de estos hornos es el aire de enfriamiento, el cual es introducido a presión por la parte baja del fondo del horno acondicionando la cal a una temperatura inferior a los 100° C permitiendo de esta forma ser utilizada para aplicaciones diversas.

2.2.2 Horno rotatorio largo

El funcionamiento es muy similar al de un horno de CLINKER, en este horno la caliza es alimentada en la parte posterior a través de un chifle que está integrado a la recámara del horno.

El flujo de material y de gases es a contracorriente pudiéndose definir en el horno tres secciones básicas.

- Zona de precalentamiento
- Zona de calcinación
- Zona de enfriamiento

A medida que el material avanza por el horno, se forman tres zonas bien definidas que dependen del tamaño de las partículas; las más grandes tienden a colocarse en la parte externa de la carga de material, lo más cercano al ladrillo; mientras que las partículas medianas y pequeñas tienden a moverse en el centro de la cama del material. El grado de llenado de estos hornos usualmente se encuentra en el orden del 10 al 12%.

Usualmente se construyen anillos de retención en el interior del horno en cada una de las zonas previamente enunciadas con el objetivo de aumentar el tiempo de retención del material en el horno.

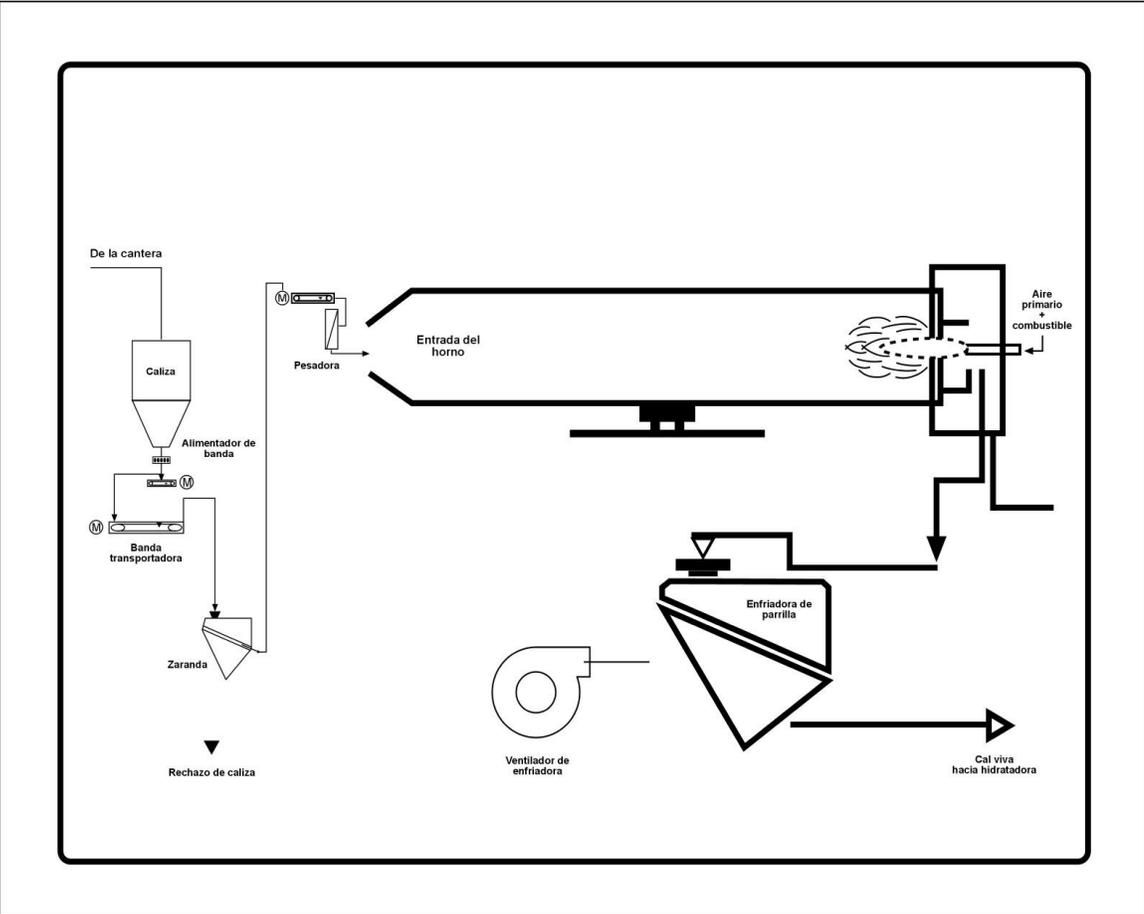
Debido al diseño del horno tipo contracorriente, la cal producida en estos hornos tiende a ser sobre quemada especialmente cuando no se toman las medidas operativas adecuadas en el control de la temperatura dentro del horno o en la distribución granulométrica en la alimentación. (Figura 2)

2.2.3 Horno rotativo con precalentador

Este tipo de horno combina las características de un horno vertical a contracorriente y un horno largo rotatorio. El material es alimentado por la parte superior del precalentador donde este sufre el proceso de precalentamiento (piedras grandes) y calcinación (piedras pequeñas). El material es dosificado al horno rotatorio a través de un sistema neumático que las dosifica al interior del tubo del horno donde las piezas segregan de acuerdo a su tamaño tal como se describió en el tema de horno rotatorio largo; protegiendo de esta manera las piezas ya calcinadas en el centro de la cama de material y las más grandes son calcinadas a lo largo del horno.

Debido al continuo movimiento que sufre la cama de material en el interior del horno rotatorio, las impurezas absorbidas en el precalentador (cenizas y azufre) provenientes de los combustibles son eliminados y un producto de mejor calidad es ofrecido.

Figura 2. Funcionamiento de un horno horizontal rotativo para fabricar cal viva



2.3 Quemadores

2.3.1 Generalidades

Los requerimientos para un quemador de horno desde el punto de vista del proceso son:

- a) El quemador debe estar en la capacidad de quemar por completo cualquier combustible: carbón, coque, aceite, gas natural, combustibles de desecho y mezclas de éstos con poco exceso de aire y con una mínima producción de monóxido de carbono y de óxidos de nitrógeno (NO x).
- b) El quemador debe estar en condiciones de producir una llama corta, esbelta y muy radiante. Este es un requisito para una buena transferencia de calor de la llama al material en la zona de combustión.
- c) La forma de la llama debe ser capaz de formar una capa densa y estable sobre el ladrillo refractario en la zona de combustión del horno.
- d) El quemador debe utilizar la cantidad necesaria de aire primario (aire de combustión), ya que éste proporciona básicamente el oxígeno necesario para quemar la totalidad de combustible; generalmente se utiliza en exceso del 5 al 25%.

Existen varios parámetros importantes para encontrar el quemador óptimo:

1. El momentum o cantidad de movimiento del aire primario
2. El remolino del aire primario
3. El diseño del quemador

2.3.2 Funciones de un quemador

El quemador en un horno rotatorio funciona como un inyector cuyo propósito es atraer el aire secundario que viene del enfriador hacia la llama a fin de que el combustible se quemara lo más cerca posible de la línea central del horno.

La velocidad de la boquilla del quemador depende de la presión de aire, la cual depende del ventilador de aire primario o de un soplador.

2.3.3 Tipos de quemadores

2.3.3.1 Quemadores de carbón

Los quemadores de carbón pulverizado más simples son normalmente de tubo de acero recto, tal vez con una punta de quemador cónica que puede cortarse hasta que se obtenga la forma de la llama requerida. En la bibliografía se puede encontrar una curva para verificar la velocidad óptima de la inyección de quemadores rectos de carbón en función de la relación del aire primario. Sin embargo es preferible utilizar quemadores de llama ajustable.

2.3.3.2 Quemadores de gas

Es requisito primordial cuando se trate de quemadores de gas natural la posibilidad de producir una zona de flujo reverso en el centro de la llama, a fin de conseguir localmente la atmósfera reductora en la que las moléculas hidrocarbonadas se aglomeran formando cadenas más anchas (hollín). Esto es necesario para aumentar la emisividad de la llama del gas, siendo esta una condición previa para la transferencia de calor en la zona de combustión.

2.3.3.3 Quemadores de aceite

Estos quemadores utilizan una boquilla que consiste en un orificio circular con una aguja cónica que atraviesa en forma concéntrica. La boquilla tiene forma de anillo y el ancho del anillo determina el tamaño de las gotas. El objetivo primordial de una boquilla de quemador de aceite es atomizar el aceite en forma de gotas de tamaño adecuado y distribuirlas al aire de combustión.

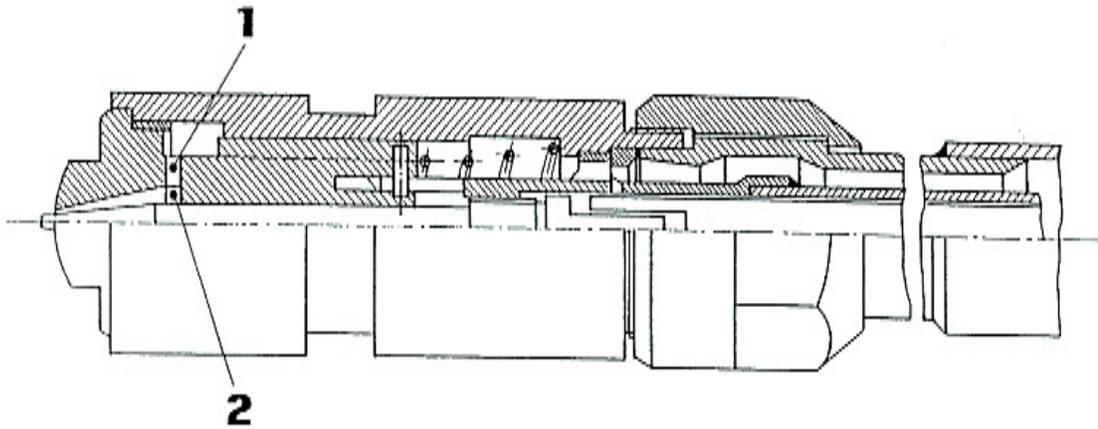
2.4 Clases de quemadores

2.4.1 Quemador de un flujo (mono-canal)

Formado solo de un tubo aislado de acero liso en el cual una parte es de acero termo-resistente. El tamaño del orificio debe ser tal que produzca el volumen de aire y la velocidad de inyección deseados dentro del rango de presión del ventilador. Para hacer más flexible al quemador, la parte del orificio puede hacerse de distintos diámetros intercambiables.

Se diseñó originalmente para prender directamente molinos de carbón, sin embargo este tipo de quemador también es apropiado para carbones con alto contenido de ceniza y capacidad de abrasión ya que el tubo del quemador está menos expuesto al desgaste. (Figura 3)

Figura 3. Quemador de aceite con válvula de aguja



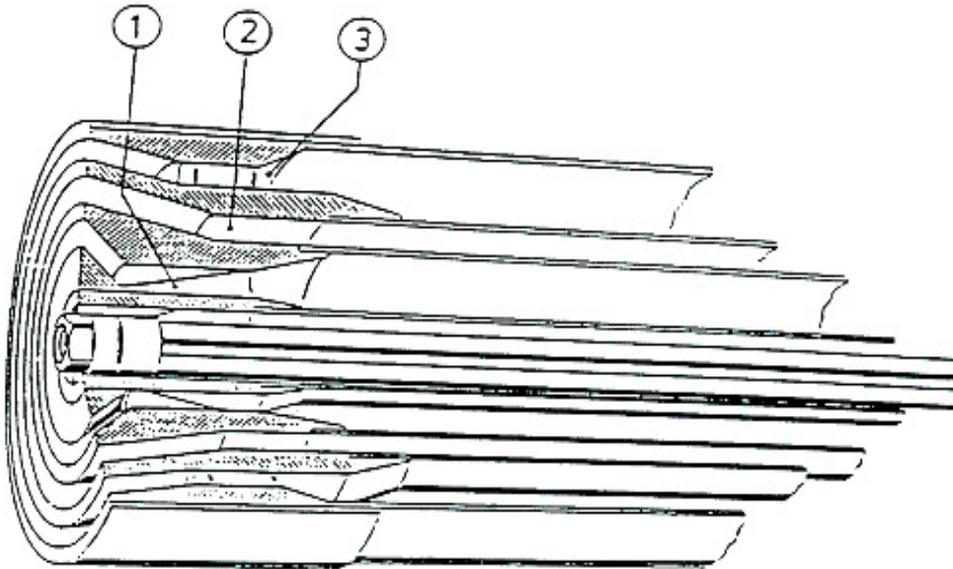
Fuente: Notas Técnicas, Cementos Progreso, S.A..

1. ranuras tangenciales
2. cámara de rotación

2.4.2 Quemador combinado (multi-canal)

Es un quemador de tres canales para combustión combinada de carbón y aceite, puede quemar carbón o coque de petróleo en un rango de 0 – 1.

Figura 4. Quemador combinado de tres canales.



Fuente: Notas Técnicas, Cementos Progreso, S.A.

- (1) aire radial
- (2) aire de transporte
- (3) aire axial

Las características más importantes se enumeran a continuación:

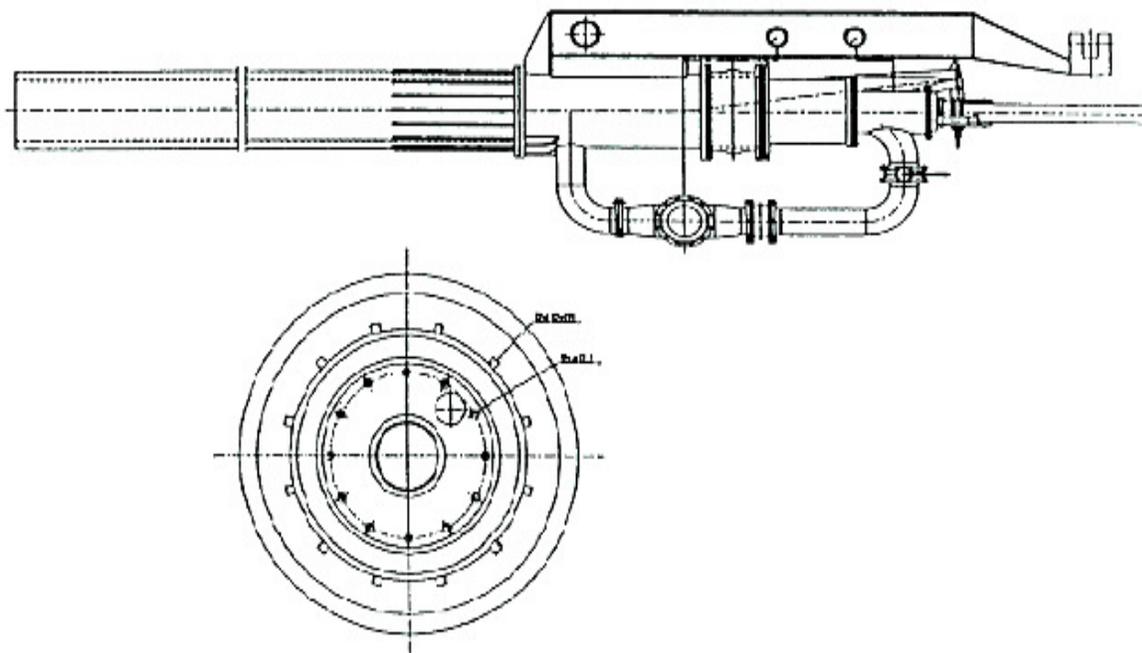
- (a) Momentum de aire primario hasta 2000% m/s.
- (b) Fácil ajuste, la suspensión especial del tubo interno minimiza la fricción aún cuando el tubo del quemador está sujeto a esfuerzos de flexión y calor. Las aperturas de la boquilla para ambos canales de aire se pueden ajustar dentro de un rango muy amplio.
- (c) Gran cantidad de aire axial
- (d) Larga vida, el carbón molido se introduce en dirección axial al 100% produciendo un mínimo de desgaste. Esto es particularmente importante cuando se van a utilizar tipos de carbón con alto contenido de ceniza.

2.4.3 Quemador de un flujo (con dos canales)

Está diseñado para un consumo mínimo de aire primario. La tubería de protección está rodeada de cuatro tubos concéntricos formando cuatro secciones transversales anulares. Las secciones cruzadas son: del centro hacia fuera, el conducto de aire primario interno, el conducto de carbón y transporte de aire, el conducto de flujo de retorno y el conducto de aire primario externo.

El aire primario será suministrado por un soplador rotatorio, este puede controlarse mediante una válvula de escape operada centralmente conectada a la línea de aire entre el soplador rotatorio y el quemador. La forma de la llama se puede cambiar ajustando el flujo de aire primario. Una alta presión (y flujo) darán una llama corta y luminosa, en tanto que una baja presión de aire dará una llama más larga y menos luminosa. (Figura 5)

Figura 5. Quemador de carbón con tubos concéntricos



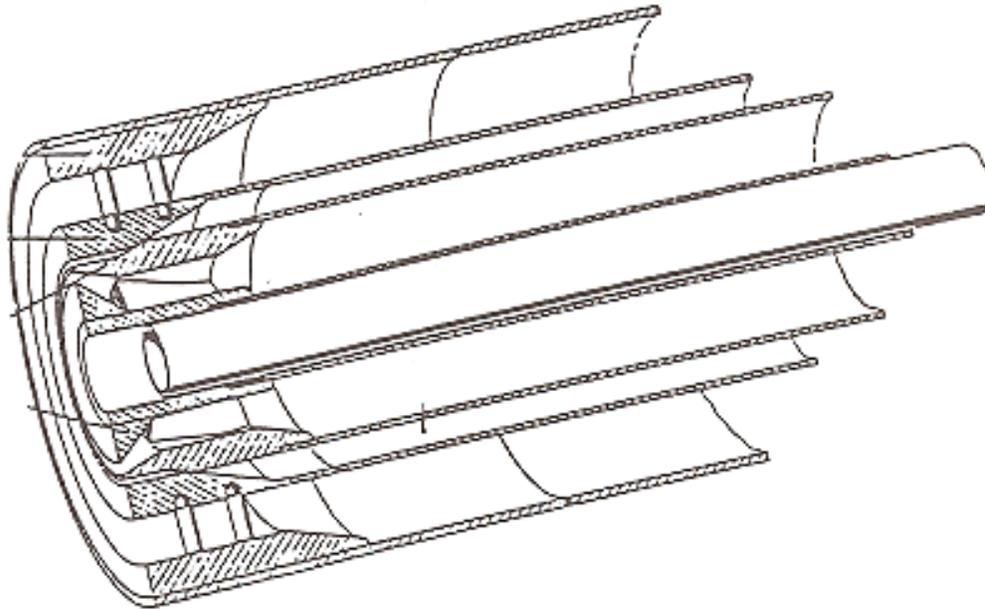
Fuente: Notas Técnicas, Cementos Progreso, S.A.

2.4.4 Quemador múltiple (aceite/carbón/gas)

Representa un nuevo diseño con un tubo colocado en el centro, este sirve para introducir combustibles gaseosos y líquidos rodeados de un canal anular de carbón el cual está nuevamente rodeado de dos tubos colocados céntricamente formando dos canales de aire primario, uno para aire radial y otro para aire axial.

Los dos chorros de aire se mezclan antes de ser inyectados a través de la boquilla cónica de aire. Los dos tubos externos, el de aire radial y el tubo del quemador forman una estructura de soporte muy rígida que garantiza una reflexión mínima del tubo del quemador y una larga vida de los elementos refractarios. En la siguiente figura se muestra un quemador de gas, el cual utiliza varios canales para poder llevar todos los elementos que se necesitan para la combustión.

Figura 6. Quemador de gas



Fuente: Notas Técnicas, Cementos Progreso, S.A.

(*) gas axial, gas radial, aire de enfriamiento

Las características pueden resumirse de la siguiente manera:

1. Aire primario de 6 a 8%
2. Inyección del combustible cerca de la línea central del quemador.
3. Diseño robusto con pocas piezas móviles.
4. Boquilla de aire ajustable, 50 – 100% del área completa con detección mecánica de la posición de la boquilla.

5. Ajuste preciso del remolino utilizando un amortiguador en la entrada de aire. No hay piezas móviles en la punta del quemador.
6. Llama corta, estable, no divergente que ofrece una zona de combustión corta. Esto implica menor temperatura de salida del horno, menores temperaturas en la cubierta del horno (prolongación de la vida del revestimiento).
7. Evolución del NOx moderada.
8. Muy apropiado para combustibles alternativo

2.5 Alimentación de carbón pulverizado al quemador

2.5.1 Diseño de la salida de la tolva

- a) La tolva deberá diseñarse para flujo de masa.
- b) La sección de salida que ha de ser activada para impedir el arqueo de carbón pulverizado, debe ser por lo menos de 1200 mm de diámetro para salidas circulares y de 6000 x 800 para descargas ranuradas
- c) Una inclinación de tolva de 70 grados no es suficiente en la mayoría de los casos, ni siquiera cuando se trate de tolvas de acero inoxidable. (Figura 7)

Los sistemas de aireación por impulsos para la activación del flujo sólo son adecuados para tolvas que alimentan un sistema de dosificación por pérdida de peso.

2.5.2 Transporte neumático al quemador

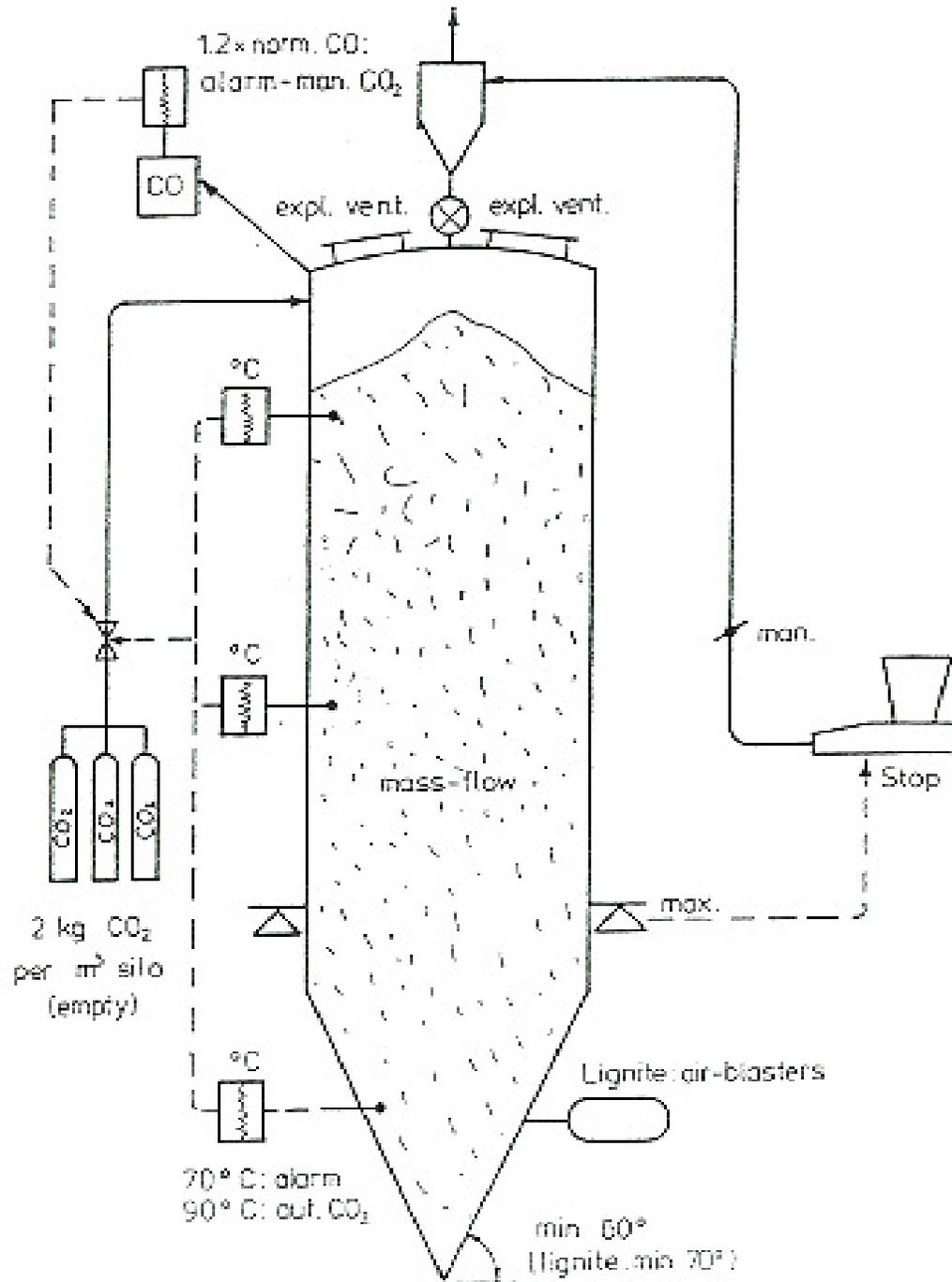
La relación polvo / aire no se considera crítica, los valores normales son del orden de 5Kg/m^3 ; pero se ha comprobado que no existen problemas con valores de hasta 12kg/m^3 .

Las fluctuaciones causadas por el dispositivo de alimentación de carbón al aire de transporte (bomba neumática, válvula neumática rotatoria) deberían evitarse por un diseño adecuado del alimentador (tamaño, velocidad de tornillo, velocidad de cierre de aire, número y disposición de celdas de alimentador rotatorias, desempolvamiento).

La velocidad del dispositivo de transporte neumático al quemador es no de los puntos más críticos para el flujo regular de carbón. Para evitar las pulsaciones causadas por formación de bolsas en la tubería de transporte neumático, se debería de manejar una velocidad superior a 32m/s .

La tubería de transporte neumático debería disponerse exclusivamente en secciones por fuerzas centrífugas. Los mejores resultados se obtienen con marmitas de derivación.

Figura 7. Silo para almacenamiento de carbón molido



Fuente: Notas Técnicas, Cementos Progreso, S.A.

2.6 Sistemas de almacenamiento de carbón

Los más comunes para dosificar carbón son:

1. Tornillo medidor de carbón solamente
2. Tornillo medidor de carbón, seguido de una pesa de impacto.
3. Pérdida del sistema de pesaje tipo Simplex, el tanque de alimentación se coloca sobre celdas de carga. El tanque se llena y se desocupa de manera alterna.
4. Dosificador Phiser, consiste en una máquina compacta que funciona simultáneamente como pesa alimentadora y como dispositivo de transporte del carbón.

3. ANÁLISIS ECONÓMICO DE QUEMADORES

La decisión a favor de un sistema de combustión que satisfaga las necesidades de una empresa depende de varios factores, como por ejemplo: para quemadores de un solo canal, en el donde el combustible y el aire se introducen juntos a través de un boquilla común, la cantidad de aire estará determinada por el sistema del molino de carbón, lo cual implica que es posible ajustar la forma de la llama durante la operación.

En quemadores de múltiples canales, la cantidad de aire primario, la velocidad de descarga y el remolino son ajustables y, por lo tanto, se puede ajustar la forma de la llama con varios controles propios del sistema.

Sin embargo el más importante es el factor económico, que nos indica si el proyecto es favorable o no para la empresa. Aquí se presentan tres opciones de inversión en quemadores con su respectivo tiempo de recuperación que se pueden utilizar para la fabricación de cal viva en Planta La Pedrera, Cementos Progreso S.A.

3.1 Quemador de carbón (un flujo)

El quemador cotizado para la planta La Pedrera es un quemador de un solo flujo, es capaz de quemar carbón o coque de petróleo, se puede utilizar solo para hornos rotativos ya que el manejo es sumamente complicado en hornos verticales.

El proyecto no solamente considera la necesidad de un quemador nuevo, sino un sistema completo de secado, molienda y alimentación al quemador. Estos temas se desarrollan más adelante en este estudio.

No. 1 QUEMADOR DE CARBÓN 52 MIL US \$

3.2 Quemador de aceite (un flujo)

Actualmente se encuentra instado un quemador de este tipo en la planta La Pedrera sin embargo debido al alza en los precios de los combustibles líquidos se presenta este proyecto para poder sustituir el aceite quemado por carbón mineral en la fabricación de cal viva.

No. 2 QUEMADOR DE ACEITE 48 MIL US \$

3.3 Quemador de carbón– aceite (flujo combinado)

Otro tipo de quemador cotizado es el de flujo combinado que es capaz de quemar carbón y aceite, aceite-gas y otros combustibles alternos (plástico, madera, caucho, etc). Esta opción sería de gran beneficio para la empresa ya que actualmente en instalaciones de la planta La Pedrera se quema aceite quemado (ACEITE) y adherir un combustible sólido en el proceso de fabricación de cal viva en un horno rotatorio reduce el costo de fabricación en un 40% (figura 8). Y los cambios en el sistema que serían mínimos se analizan a continuación:

No. 3 QUEMADOR DE FLUJO COMBINADO 75 MIL US \$

3.3.1 Sistema de Secado y Molienda

En las instalaciones de la planta existe un sistema de secado, sin embargo el manejo de carbón en este tipo de equipos requiere la inversión en equipos sofisticados para la detección de explosiones y elevadas temperaturas dentro del sistema, esto no parte del estudio realizado.

El molino óptimo para la molienda de carbón es el vertical ya que el costo de operación es menor que un molino de bolas sin embargo el costo de inversión supera el millón de dólares. Tomando en cuenta esto se evaluó la posibilidad de utilizar un de los molinos de bolas que existen en la planta, con una producción diaria de 25 toneladas, cantidad suficiente para alimentar el horno rotatorio y obtener 200 ton/dia de cal viva (capacidad nominal del horno).

No. 4	MOLINO DE BOLAS	0 US \$
-------	-----------------	---------

3.3.2 Sistema de Transporte

En el sistema de transporte incluye, bombeo de carbón, silo de almacenamiento, dosificador de carbón al quemador. Debido a que en la planta La Pedrera las producciones de los diferentes materiales han reducido significativamente existen instalaciones que pueden utilizarse con arreglos mínimos.

No. 5	SISTEMA DE TRANSPORTE	5 MIL US \$
-------	-----------------------	-------------

El gran total para la inversión en un quemador de flujo combinado se dividió en tres secciones y los rubros se presentan en el siguiente cuadro:

A continuación se presenta una tabla indicando los tres tipos de quemadores que se están analizando.

Tabla II. Resumen de costos de inversión para tres tipos de quemadores y equipo auxiliares necesarios para su funcionamiento

TIPO DE QUEMADOR	COSTO QUEMADOR (US \$)	SISTEMA DE SECADO Y MOLIENDA (US \$)	SISTEMA DE TRANSPORTE (US \$)	COSTO TOTAL (US \$)
CARBÓN	52 MIL	0	5 MIL	57 MIL
ACEITE o BUNKER	48 MIL	0	0	48 MIL
COMBINADO (aceite/carbón)	75 MIL	0	5 MIL	80 MIL

3.4 Métodos tradicionales para medir la rentabilidad

3.4.2 Tasa de rendimiento

Es un método tradicional y muy sencillo, el cálculo se basa en la siguiente ecuación:

Ecuación No. 1

$$\text{Porcentaje de rendimiento} = (\text{utilidad anual} / \text{capital invertido}) \times 100$$

3.4.3 Período de recuperación

Este es otro método tradicional para medir la rentabilidad, nos indica el tiempo que se requiere para que los flujos de efectivo permitan recuperar el desembolso inicial para capital fijo. Se puede expresar de la siguiente forma:

Ecuación No. 2

$$\text{Tiempo de recuperación} = \text{Inversión} / (\text{Ganancias anuales} - \text{costo anual})$$

Este método permite comparar varios proyectos en base al tiempo de recuperación, tomando en cuenta que siempre se le dará mayor preferencia a las de menor tiempo de recuperación. Ya que el objetivo de este trabajo es verificar la factibilidad del proyecto, las inversiones enumeradas anteriormente serán evaluadas con este método en el siguiente cuadro:

Tabla III. Resumen del análisis sobre el tiempo de recuperación para la inversión inicial de un quemador para la fabricación de cal viva en un horno rotativo.

No.	Tipo de quemador	Inversión inicial	Tiempo de recuperación (años)
1	Carbón	57 MIL US \$	1.04
2	Aceite	48 MIL US \$	0.72
3	Aceite - Carbón	80 MIL US \$	2

. Para obtener estos resultados se tomó como base de cálculo un ganancia anual de 100 MIL US \$

3.4 Cálculo de la mezcla ideal para la fabricación de cal viva

3.4.1 Evaluación del costo de operación de un quemador combinado que utiliza carbón y bunker para su funcionamiento. Tomando como base de calculo los siguientes datos:

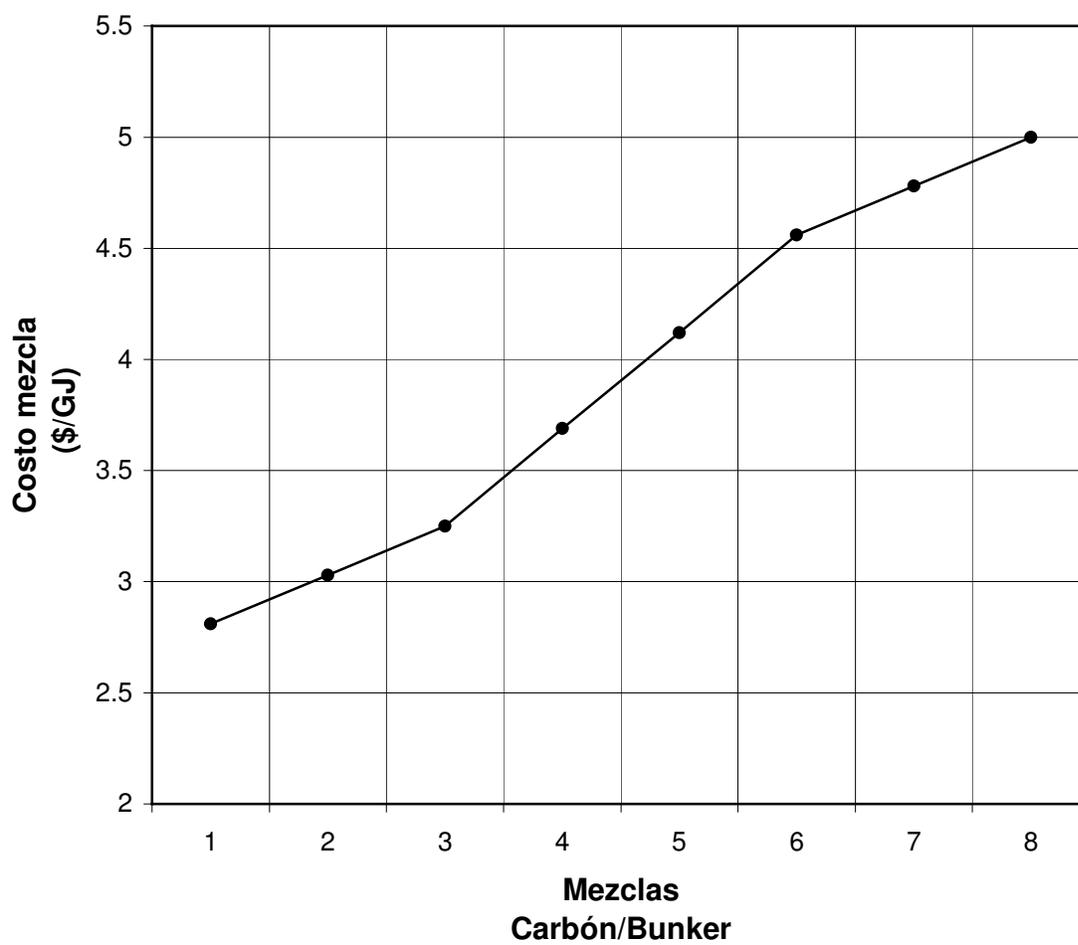
- costo de molienda de carbón : \$ 5/ton = \$ 0.25 / GJ
- costo de carbón molido : \$ 2.56/GJ
- costo de bunker : \$ 5.00/GJ
- energía necesaria para producir una tonelada de cal viva :
10,460 GJ/ ton cal

Realizando operaciones básicas se obtienen los resultados que se muestran en la siguiente tabla.

Tabla IV . Costos para mezclas de carbón y bunker con respecto a la energía que producen.

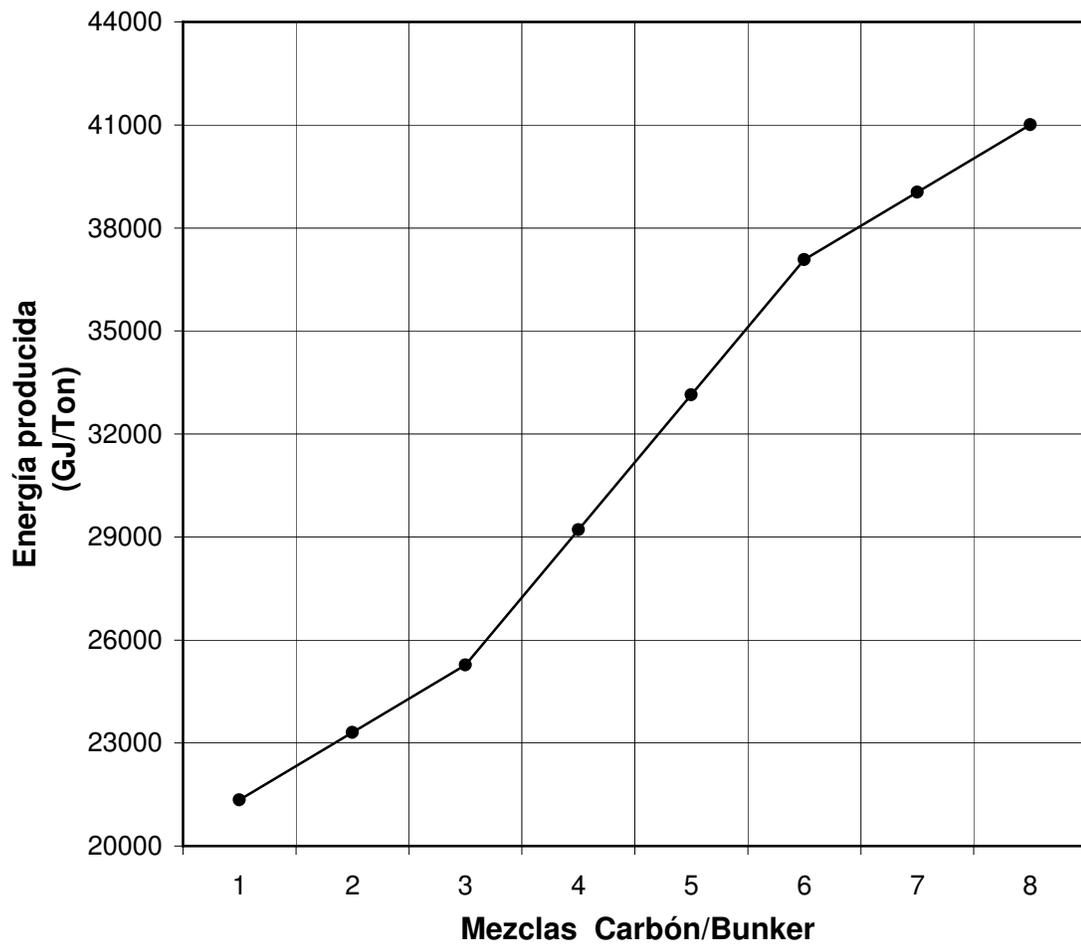
MEZCLA	CARBÓN (%)	BUNKER (%)	COSTO MEZCLA (\$/GJ)	ENERGIA MEZCLA (GJ/ton)	COSTO /TON cal viva (\$/ton)
1	100	0	2.81	21,338.4	29,392.6
2	90	10	3.03	23,304.9	31,683.3
3	80	20	3.25	25,271.4	33,995.0
4	60	40	3.69	29,204.3	38,597.4
5	40	60	4.12	33,137.3	43,095.2
6	20	80	4.56	37,070.2	47,697.6
7	10	90	4.78	39,036.7	50,009.3
8	0	100	5.00	41,003.2	53,200.0

Figura 8.
Mezcla de carbón/bunker vs. Costos por energía de mezcla



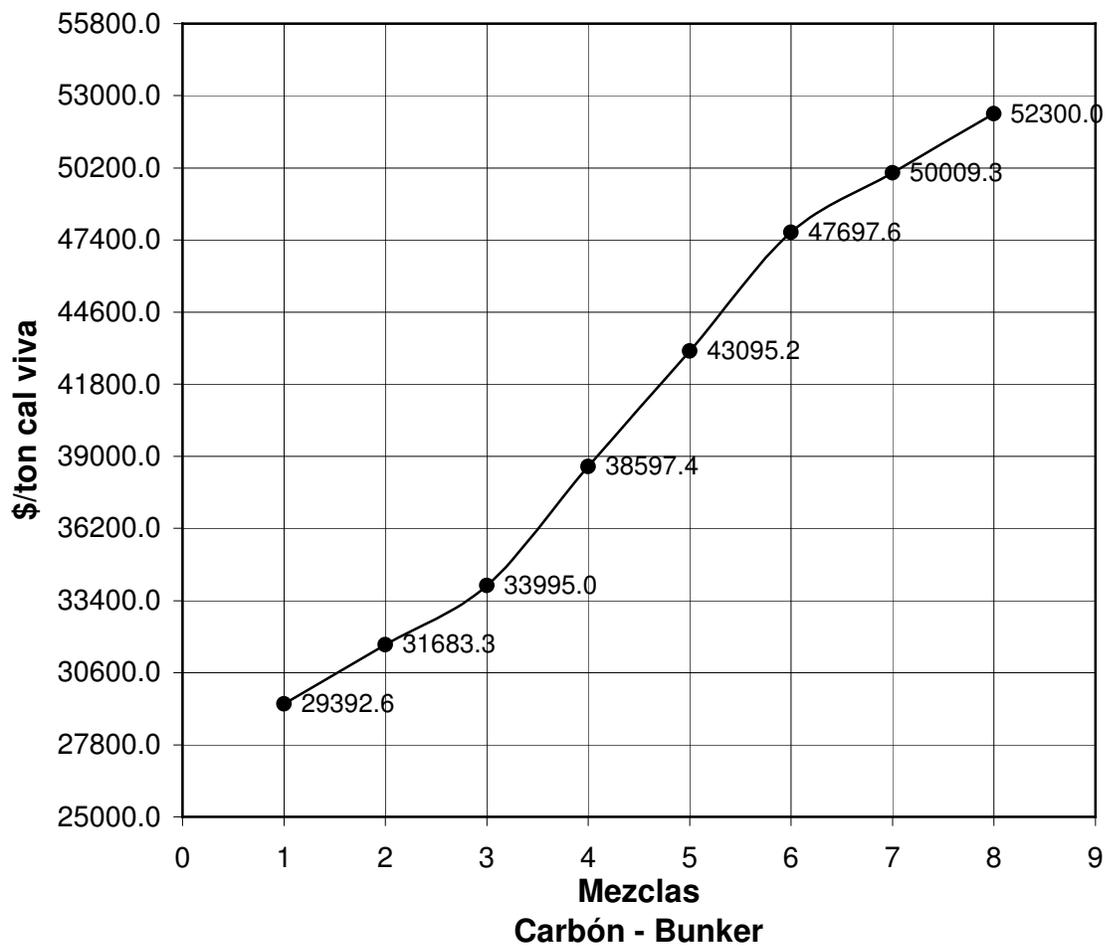
*. Ver datos en tabla IV.

Figura 9.
Energía producida vs. Mezclas de carbón/bunker



*. Ver datos en tabla IV.

Figura 10
Costo de fabricación de cal viva con mezclas
de carbón/bunker vs. Costo /ton cal viva



*. Ver datos en tabla IV.

3.5 Discusión de resultados

Después de evaluar los tiempos de recuperación para los tres tipos de quemadores se resume lo siguiente, las tres inversiones tienen tiempos de recuperación muy cortos y ninguno excede el tiempo estándar definido dentro de las políticas de la empresa (ver tabla IV), esto favorece directamente al proyecto propuesto porque el tiempo es uno de los factores principales al momento de una inversión.

Ya que el tiempo de recuperación no es un factor limitante discutiremos sobre otras variables que deben de tomarse en cuenta al momento de utilizar otro tipo de combustible en la fabricación de cal viva en la planta La Pedrera, S.A.

Como es sabido las tres clases de quemadores que se analizan en el presente trabajo de graduación se diferencian por el tipo de combustible que manejan, ya que puede ser: combustible sólido (carbón mineral o pet coke) , líquido (bunker o aceite quemado) y un tercero que puede manejar mezclas de ambos combustibles (sólidos y líquidos).

Un quemador que utilice como combustible, materiales sólidos en este caso hablaremos de carbón mineral ya que es el tema en estudio, tiene una inversión inicial de US \$ 57 mil, este capital se recupera en un tiempo estimado de un año cinco meses. Sin embargo para instalar un sistema que solo utilice carbón mineral en el proceso de combustión es necesario realizar varios cambios significativos en el flujo de operaciones de la planta; y si bien es cierto que el objetivo de este estudio es utilizar solo carbón mineral en el proceso de fabricación de cal viva, también es cierto que se deben optimizar recursos de la empresa utilizando sistemas ya existentes tales como: bombeo, almacenaje, transporte y calentamiento de combustibles líquidos.

Por tal motivo se presenta la opción del quemador combinado (carbón y bunker) en donde la inversión inicial es de US \$ 80 mil y el tiempo de recuperación es de dos años. Con este sistema se aprovechan todos los sistemas de almacenaje, calentamiento y bombeo del combustible líquido y con ajustes mínimos se pueden implementar otros equipos existentes para poder trabajar carbón mineral entre ellos podemos mencionar, silos para almacenaje, bombas para el transporte, molinos para reducción de tamaño del carbón, entre otros.

Es importante mencionar que para realizar el arranque en un horno horizontal rotativo es necesario contar con una pequeña cantidad pequeña combustible líquido, este es dispensado en forma de espray para que se produzca la llama, ya que una desventaja que posee el carbón es que no arde sin la ayuda de otro combustible y en este caso será el bunker.

Una mezcla de carbón y bunker que proporcione la energía necesaria para transformar carbonato de calcio a óxido de calcio es la mezcla No. 2 (90% carbón y 10% bunker), el costo de esta mezcla es menor en relación a las demás (ver figura 8) y también proporciona la energía necesaria para la reacción que se lleva a cabo en el proceso de fabricación de cal viva (ver figura 9). Al utilizar esta mezcla se tiene un ahorro del 40% en el costo por tonelada de cal viva fabricada (ver tabla 4), con respecto a utilizar solo bunker como combustible.

Debido a que el tiempo de recuperación está dentro de los límites permisibles para la empresa, los cambios en el proceso son mínimos y el ahorro en los costos de operación son significativos; se considera esta inversión factible.

El quemador de aceite posee un sistema que permite estabilizar la zona de combustión en muy poco tiempo y los resultados en el producto final son satisfactorios para los clientes. La inversión de este equipo es recuperable en poco menos de un año (9 meses). Sin embargo el costo del combustible para este tipo de quemadores supera el doble al precio de el carbón, por ello esta opción se considera no es factible.

Es importante recordar que la calidad del producto final depende directamente de la calidad de la llama, es por eso que debemos realizar la menor cantidad de cambios en el sistema tales como: alimentación de combustible, una variación en el aire primario o secundario ya que esto ocasiona inestabilidad en la zona de combustión provocando de esta forma que la reacción no realice adecuadamente ($\text{carbonato de calcio} + \text{calor} = \text{cal viva}$) y el horno produzca un material de mala calidad; los análisis físico químicos de las cales no serán estudio de este trabajo de graduación.

Como se mencionó antes, los cambios para la implementación de este sistema son mínimos ya que en las instalaciones se encuentran equipos en buenas condiciones para la implementación del mismo.

4. PREPARACIÓN DEL CARBÓN

4.1 Generalidades

4.1.1 Temperaturas dentro del sistema de molienda

Para producir un combustible adecuado para un horno rotativo, el carbón se muele y se seca, generalmente esto se realiza dentro de una planta combinada de molienda y secado.

Para facilitar la molienda y el manejo de polvo de carbón, así como la combustión; el contenido residual de humedad del carbón debería estar dentro del margen de la humedad higroscópica (entre 0.5 – 1.5%) para carbones normales.

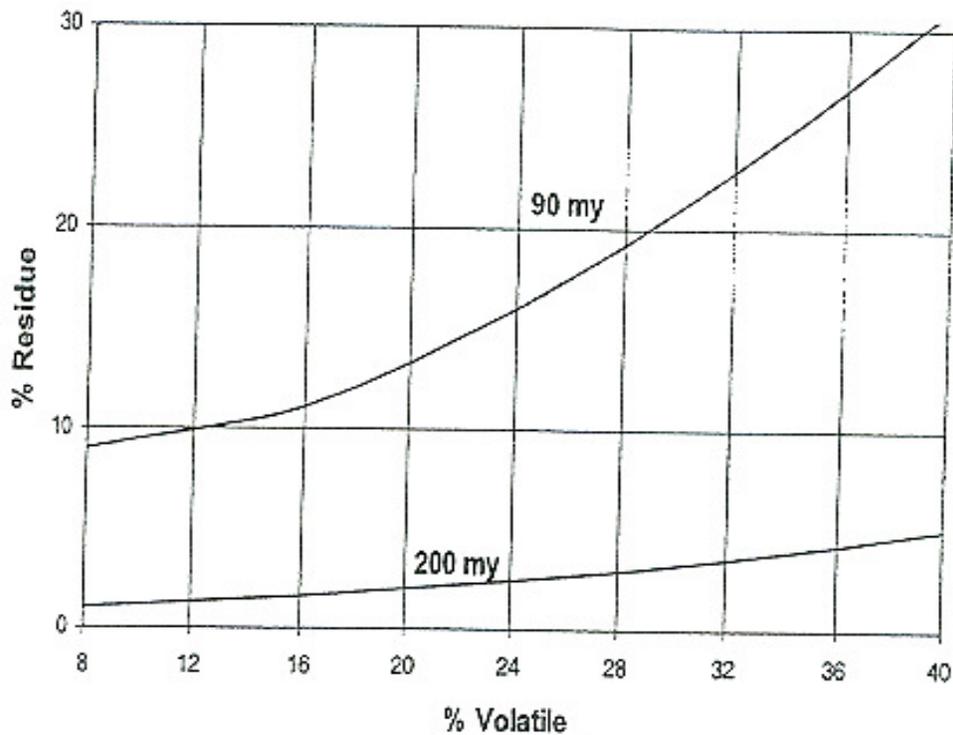
La temperatura exacta de secado que se requiere para ciertos tipos de carbón puede ser determinada al establecer la curva de desecación, es decir el agua residual como función de la temperatura. A partir de esta curva, la temperatura de salida del molino se registra y deberá mantenerse constante dentro de límites muy estrechos; esta temperatura se controla mediante el suministro de calor al molino.

El secado excesivo de carbón incrementará el peligro de explosión como resultado de la carga electrostática. Por lo tanto, en el caso de problemas con el punto de condensación, solo se deberá incrementar la cantidad de aire que atraviesa el molino pero nunca su temperatura.

4.1.2 Finura de la molienda

La finura requerida de molienda del carbón depende del contenido de materia volátil y del lugar donde será quemado. Y para lograr una buena combustión con la formación satisfactoria de la llama en el horno es muy importante la finura adecuada del carbón molido. A continuación se presenta una gráfica que indica finuras ideales en la molienda.

Figura 11. Fineza recomendada para carbón molido



Fuente: Notas Técnicas, Cementos Progreso, S.A.

4.1.3 Secado del carbón

El secado se realiza mejor durante el proceso de molienda, además de la humedad que se libera y se evapora a temperatura ambiente; el carbón contiene **agua higroscópica** o inherente que podría definirse como agua que se evapora por el calentamiento de 30 a 105 °C.

El riesgo de aparición de fuego y explosiones puede limitarse considerablemente si el carbón molido es fabricado con un cierto contenido de agua residual.

Normalmente la humedad residual para diferentes tipos de carbón se encuentra dentro de los siguientes porcentajes: antracita y coque de petróleo (0.5 – 1.0%), carbones bituminosos (1.5 – 2.05%) y lignitos (8 – 12%).

4.2 Molinos para moler carbón

Para la molienda de carbón se pueden usar máquinas trituradoras como el molino vertical, el molino de bolas, el pulverizador de carbón, el triturador de impacto horizontal, la prensa de rodillos y otros. A continuación se presenta una pequeña descripción de los más comunes.

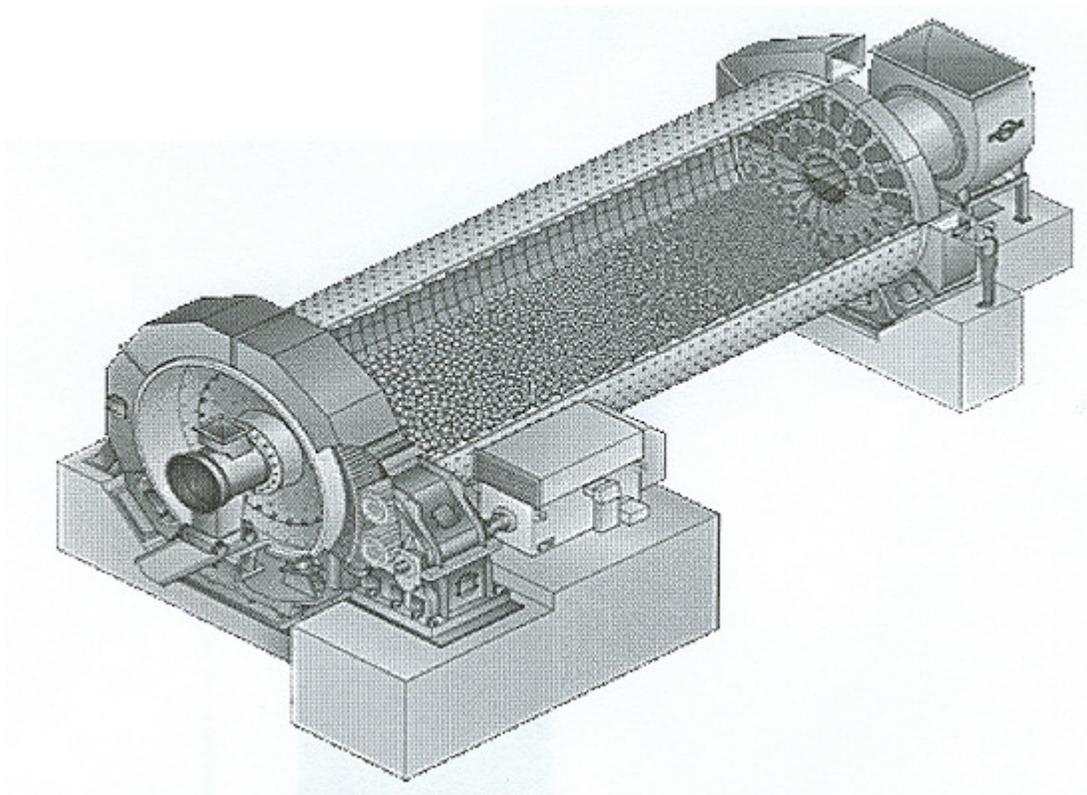
4.2.1 Molinos de bolas

Es un molino diseñado para secar y moler; el material pasa primero a través de una cámara de secado con levantadores, es totalmente barrido por aire de manera que todos los materiales de descarga del molino son transportados hacia el separador (figura 12).

El material grueso de retoro es transportado al extremo de entra del molino por medio de una rosca transportadora. En la tolva de llenado, el material seco rechazado es mezclado con el carbón húmedo, eliminando así el riesgo de que el material se encienda en la entrada del molino.

El separador suele ser de tipo estático, y el control se puede realizar por desplazamiento vertical de un tubo central interno para los tamaños más pequeños y por ajuste de paleta para los tamaños más grandes.

Figura 12. Vista seccional de un molino de bolas



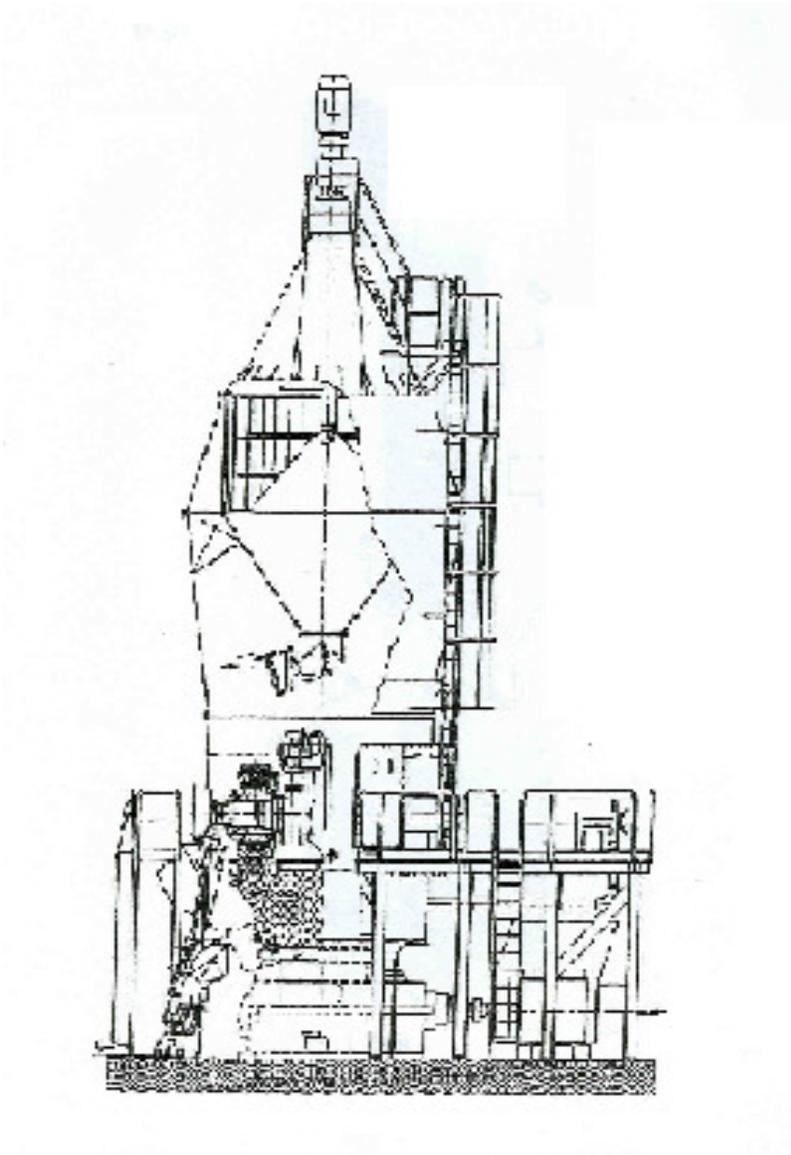
Fuente: www.polysius.com

4.2.2 Molino vertical de rodillos

La molienda de carbón tiene lugar entre una mesa rotativa y tres rodillos moledores. El carbón crudo es introducido hacia el centro de la mesa y desde allí pasa a través de los rodillos y la mesa.

Luego de haber quedado molido, el carbón sigue su curso a lo largo del borde de la mesa y entra en la corriente de aire caliente que viene del anillo de la tobera que rodea a la mesa de molienda. El carbón molido es llevado por aire hasta el separador estático o dinámico incorporado. Las partículas gruesas son devueltas al molino a través del cono de rechazo del material grueso para ser molido nuevamente y las partículas finas salen del molino con el aire a través de la salida del molino (figura 13).

Figura 13. Molino vertical para moler carbón



Fuente: Notas Técnicas, Cementos Progreso, S.A.

Tabla V. Ventajas y desventajas de los molinos verticales sobre molinos de bolas

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Menor consumo de energía	Mayor cantidad de aire a desempolvar
Mayor capacidad de secado	Menos apropiado para carbón abrasivo. Repuestos costosos y paradas largas por reemplazo.
Rendimiento variable con respecto al consumo de combustible de los hornos	Sensible a las variaciones del grado de alimentación y de su calidad
Rápida respuesta al rendimiento de la alimentación	Mayores costos de mantenimiento
Acepta alimentación de grandes proporciones	-----
Menor nivel de ruidos	-----
Requiere menos espacio	-----

4.2.3 Trituradora giratoria

Utiliza una cabeza de trituración en forma de un cono truncado el cual esta montado sobre un eje y a su alrededor un sistema de corazas. La parte superior está montada sobre un sistema flexible que le permite un movimiento circular en la parte baja.

El principio de reducción de tamaño es por compresión entre el cono y las corazas.

4.2.4 Trituradora de rodillo

Este sistema cuenta con un eje central que tiene varios martillos los cuales giran a altas revoluciones haciendo que el material que entra sea golpeado contra la estructura interna (corazas). Un grupo de barras de acero ubicadas en la parte baja de la sección de martillos llevan a cabo la selección entre el material de tamaño que se desee.

5. ALMACENAMIENTO DE CARBÓN

5.1 Generalidades

Se conoce generalmente que el carbón presenta signos de meteorización cuando se almacena al aire libre. Esto se debe principalmente a una característica del carbón que le permite absorber oxígeno del aire, reacción que se conoce como auto oxidación.

El proceso de auto oxidación puede ser comparado con una combustión a bajas temperaturas y solo el ritmo de la reacción determina si el calor se produce por unidad de tiempo y es superior al calor que se libera en la atmósfera.

Cuando el calor es producido no puede ser liberado a la atmósfera mediante ventilación natural y conducción de calor; debido a que la temperatura dentro de la pila de carbón aumenta y a su vez acelera el proceso de oxidación provocando que el encendido espontáneo se alcance en muy poco tiempo.

La asimilación más intensiva de oxígeno se lleva a cabo durante las primeras tres semanas de almacenamiento, por lo tanto, el encendido espontáneo suele producirse dentro de los tres primeros meses con una temperatura crítica de alrededor de 70-80° C.

Algunos de los factores más importantes que aumentan el peligro de encendido espontáneo del carbón son:

1. Alto contenido volátil en el carbón
2. Cuanto más fina la granulometría del carbón, más grande la superficie reactiva para absorber oxígeno.
3. El carbón que contiene, aparte de la porción de gránulo fino, también material grueso, ya que esta estructura heterogénea facilita la entrada de aire dentro de la pila de carbón.
4. El carbón recientemente minado reacciona más rápidamente con oxígeno que el carbón almacenado desde hace mucho tiempo.
5. Carbón con un contenido de humedad anormalmente alto.
6. Componentes extraños tales como pirita, hierro y fósforo dentro de la ceniza de carbón.

Se pueden distinguir dos métodos distintos de almacenamiento de carbón respecto a una reducción del peligro de autoencendido y períodos largos de almacenaje:

5.2 Pilas no compactadas

Este método es recomendado principalmente para carbón de gránulo grueso que no contiene gránulos finos (difícil de comprimir) y también carbón magro.

Cuando se aplica este método se deberá tener cuidado con los siguientes aspectos:

- a) Los depósitos deberán empilarse en capas horizontales, de este modo se reduce la segregación, es decir, la reunión de las partículas gruesas en los bordes inferiores de la pila. Cuando se presenta encendido espontáneo dentro de un depósito de carbón, el fuego empieza normalmente en los bordes inferiores a una profundidad de aproximadamente dos metros donde el suministro de oxígeno es todavía adecuado pero, la disipación del calor es demasiado lenta.
- b) Según las características del carbón, las pilas no deberán exceder las siguientes alturas:

Tabla VI. Altura máxima para pilas NO compactadas de carbón

Característica Física del carbón	Altura (m)
Antracita - Carbón Magro	6, hasta altura ilimitada
Contenido bajo o intermedio de materia volátil (15 – 30%)	6 – 10
Alto contenido de materia volátil (> 30%)	4 – 8

- c) Diferentes tipos de carbón deberán ser almacenados en pilas distintas.
- d) Se deberán evitar los contaminantes de cualquier tipo (maderas, trapos, plásticos, etc.)
- e) La parte más estrecha de la pila deberá ir del lado de los cientos más frecuentes.
- f) El depósito de carbón deberá ser ubicado lejos de todas las fuentes de calor.

5.3 Pilas compactadas

Este método conviene más para carbón magro y para carbón que además de material de gránulo grueso tiene un alto contenido de materia fina. El depósito de carbón se construye por capas de unos 25 cm cada una y compactando capa por capa.

Depósitos de este tipo puede tener hasta 30 metros de altura y no presentan problema ninguno, ni siquiera cuando se empilan conjuntamente varios tipos de carbón. Sin embargo, a modo de precaución se deberán observar las siguientes indicaciones:

- (1) Es mejor almacenar diferentes tipos de carbón en pilas distintas.
- (2) El material deberá ser recogido de manera vertical a fin de limitar al mínimo las superficies nuevas de la pila.

(3) Los lados en pendiente de la pila son las partes más expuestas. La pendiente deberá ser sellada con cuidado especialmente del lado de los vientos.

5.4 Apilamiento de carbón en capas de premezclado

La pre-homogeneización del carbón en capas de premezclado es particularmente válida en aquellos casos donde la calidad del carbón se caracteriza por grandes fluctuaciones en el momento de la entrega.

Este método se ha venido aplicando desde hace mucho tiempo en minería de carbón, pero estas instalaciones tienen una capacidad mucho mayor de la que se requeriría en la industria de la cal o el cemento.

Básicamente se deberán tomar en cuenta los siguientes puntos:

- a) Para reducir el peligro de encendido espontáneo en los bordes de las pilas, se deberá seleccionar un método de almacenamiento que evite la segregación dentro de la pila –ejemplo: almacenamiento en capas amplias-. Esto se aplica, sobre todo, para el carbón que demuestra una alta tendencia hacia el encendido espontáneo.

- b) Contrariamente a lo que ocurre en la producción de crudos para el cemento, para la molienda de carbón no existe homogeneización posterior del producto. Por lo tanto se deberá seleccionar un método para recoger el carbón que incluya de la manera más continua posible, todas las capas del depósito de carbón, de modo que no se presenten fluctuaciones adicionales a corto plazo.

- c) Durante el apilamiento se deberá limitar al máximo el desarrollo de polvo. En principio, se deberá siempre considerar la posibilidad de incendios. Por lo tanto, el área de apilamiento deberá ser accesible para el transporte desde todos los lados, de modo que el brote de un incendio pueda ser eliminado en poco tiempo.

6. ASPECTOS DE SEGURIDAD

6.1 Supervisión de pilas de carbón crudo

Las pilas de carbón correctamente comprimidas no requieren prácticamente ninguna supervisión. Los lugares no compactados pueden ser detectados mediante pequeñas nubes de vapor, especialmente en la mañana en días fríos y pueden ser sellados fácilmente mediante compresión.

En pilas no compactadas se recomienda tomar mediciones de temperatura a intervalos de 3 – 4 m. Para hacerlo, se utilizan tubos con un diámetro de alrededor de 2.5 cm, sellados abajo que penetran en la pila hasta el fondo. Los tubos contienen termómetros protegidos por el receptáculo metálico que son leídos periódicamente. Se deberán dar atención especial a las esquinas de la pila y a los lugares más expuestos al sol.

Debido a la baja conductividad térmica del carbón, sigue existiendo la posibilidad de que un brote de incendio se mantenga sin descubrir durante mucho tiempo. Los índices de un lugar caliente son: olor quemado, formación de vapor y manchas de ceniza.

6.2 Medidas contra incendios

En carbón frescamente empilado la temperatura suele incrementar ligeramente a veces hasta 40 – 50° C. Sin embargo con medidas adecuadas de apilamiento, el aire no logra llegar hasta el interior de la pila y rápidamente se establece un equilibrio.

Cuando se presenta en un depósito un encendido espontáneo, el lugar caliente debe ser descubierto y el carbón ardiente debe ser dispersado al aire libre, si es posible. Otra posibilidad consiste en regar el brote de fuego con agua.

Los incendios de mayores dimensiones son difíciles de contrarrestar. Se debe tener cuidado al extinguir los incendios con agua, por que al entrar en contacto directo con el material en proceso de quemarse, se puede formar gas de agua, lo que genera explosiones. Además, resulta difícil contener las cenizas ardientes con agua porque el carbón repele el agua como consecuencia de la eflorescencia de alquitrán. Esto puede contrarrestar utilizando una suspensión de agua con caliza, cal, greda o arcilla en una concentración de 3 – 5 %. La suspensión se introduce mediante pozos de perforación que se distribuye según un trazado cuadrículado sobre el área del brote de fuego. Una vez extinguido el fuego, podría ser factible aumentar las concentraciones de la suspensión desde un 30 hasta un 40% para sellar las grietas más grandes.

También se puede intentar apagar el fuego cubriéndolo con desechos húmedos o con un agente extintor en forma de espuma.

6.3 Control de incendios en silos

La mejor manera para luchar contra incendios en silos consiste en sofocarlos utilizando un agente extintor en forma de espuma o mediante inercia, por ejemplo con N₂ o CO₂.

Cuando se dispone de medios adecuados de transporte, el carbón ardiente, si en caso se presenta, debería ser sacado y diseminado al aire libre. El uso de agua sin dispersar primero el carbón no tiene mucho resultado y sólo logra incrementar el peligro de explosiones debido a la formación de gas de agua.

6.4 Medidas de seguridad para explosiones de polvo

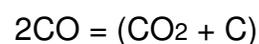
Se dispone de las siguientes medidas de seguridad para prevenir las explosiones de polvo, para luchar contra ellas o para reducir sus consecuencias:

6.4.1 Inercia

Una medida preventiva de seguridad consiste en eliminar el oxígeno que se requiere para un fuego o un incendio. Una pequeña disminución del contenido de oxígeno en la atmósfera o en la planta combinada con secado y molienda ya cambia en una medida apreciable las circunstancias para una explosión y reduce también el peligro de los incendios latentes.

Los gases que se utilizan con mayor frecuencia son: CO₂, N₂, gases de combustión, vapor de agua (es más eficaz que el nitrógeno debido a su mayor capacidad térmica molar). Además, algunos autores opinan que el CO₂, conjuntamente con carbono, tiene inclusive un efecto químico de enfriamiento ya que se lleva a cabo una reacción de equilibrio endotérmico con la formación de:

Ecuación No. 3



6.4.2 Descarga de la presión (descarga de la onda de choque)

Se entiende por descarga de la presión, todas aquellas medidas que sirven para abrir provisionalmente la instalación que anteriormente estaba cerrada en un sentido seguro al principio o después de la propagación de la explosión. Su efecto debería ser que los equipos no sean sometidos a presiones que superen su resistencia estructural.

Es una medida muy eficaz de seguridad, que solo puede ser utilizada en aquellos casos donde ni equipos ni personas son expuestas al peligro por la explosión liberada por las instalaciones de descarga de presión.

Las siguientes instalaciones pueden ser consideradas como de escape de la onda de choque:

1. Superficies rígidas no intercambiables, tales como paredes debilitadas.
2. Superficies rígidas, destructibles e intercambiables; tales como: hojas del que se desgarran, discos que se rompen, etc..
3. Instalaciones móviles de descarga de presión (puertas de descarga de presión, válvulas, etc.).

En Estados Unidos, todos los equipos y tuberías que llevan polvo de carbón deben ser construidos a prueba de presión. La presión mínima que debe soportar es 3.5bar. Sin embargo, como se sabe que la presión máxima de explosión del polvo de carbón puede llegar a 10 bar.

6.4.3 Supresión automática de explosiones

Este método permite la supresión de explosiones en su etapa Inicial, antes que el desarrollo de la presión llegue a destruir la instalación. La onda de choque que precede el frente de combustión o la radiación infrarroja de la zona de combustión es detectada mediante un dispositivo que distribuye rápidamente, mediante válvulas accionadas con detonador una sustancia de extinción eyectada bajo una presión de 40 a 120 bar.

De acuerdo a la velocidad de dispersión del agente extintor, que es varias veces de 10m/s, el éxito de la supresión de una explosión se hace más difícil a medida que incrementa la velocidad del proceso previsto de explosión.

CONCLUSIONES

1. El mejor sistema de molienda para la fabricación de cal viva, en un horno horizontal tipo rotativo utilizando carbón mineral es el molino vertical, por el bajo consumo de energía, menores costos de mantenimiento, menor impacto ambiental y mayor rendimiento productivo.
2. El mejor sistema de combustión para la fabricación de cal viva, en un horno horizontal tipo rotativo es un quemador combinado que utilice carbón y aceite en una proporción de 90/10, ya que, se ahorra un 40% en los costos de producción, con un tiempo de recuperación de capital de dos años
3. Después de realizado el estudio de prefactibilidad económica entre tres tipos de quemadores con diferentes mezclas de combustible, carbón y aceite, se encontró que el mejor, es un quemador combinado que utilice carbón y aceite; este último con un máximo del 10% para su funcionamiento.
4. Debido a que la planta La Pedrera cuenta con una variedad extensa de maquinaria y equipo que puede ser ajustado y/o modificado para la implementación de este proyecto, los cambios que deben realizarse son básicamente en sistemas de control contra incendios y sistemas de transporte.

RECOMENDACIONES

1. Utilizar las instalaciones existentes de la Planta la Pedrera, ya que de lo contrario se convertirían en chatarra. Causando pérdida al capital pasivo de la empresa.
2. Utilizar el molino de bolas existente en la Planta la Pedrera para la molienda de carbón mineral aunque no posea las mismas características que el molino vertical, de lo contrario la inversión se eleva tres veces el valor actual y el equipo quedaría abandonado.
3. Fortalecer el sistema de seguridad industrial a nivel general en la planta, debido a que una característica del carbón mineral es que arde con facilidad.
4. Llevar a cabo pruebas a nivel de laboratorio para determinar si la calidad de cal viva se mantiene después del proceso de calcinación utilizando carbón mineral.
5. Implementar sistemas de control en todos los procesos para cumplir con normas del nuevo siglo, normas ISO.

BIBLIOGRAFÍA

1. DUDA, W.H. **Cement Data Book**. Alemania: Bauverlag G. Wiesbaden, 1992.
2. FRIEDMAN S.J. **Theory of calcination**. USA: copyright, 1949
3. KENNEDY VAN SUN. **Lime calcining and hydrating systems**. Alemania: copyright, 1996.
4. LELAND BLANK, P.E. **Ingeniería Económica**. México: McGraw-Hill, 2002.
5. NOTAS TECNICAS. **Curso teórico/práctico sobre fabricación de cemento**. Guatemala: 2000.
6. PERRY'S, **Manual del Ingeniero Químico**. USA: McGraw-Hill, 1994.
7. www.pillard.com
8. www.polysius.com
9. f_c_a@uol.com.br, Cálculo del tiempo de recuperación.