



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE CIENCIAS

ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

**“OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE COMBUSTIÓN EN EL ÁREA DE
CLINKERIZACIÓN MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DE UN ANALIZADOR DE
GASES EN LA EMPRESA CEMENTO CHIMBORAZO C.A.”**

TESIS DE GRADO

PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE:

INGENIERO QUÍMICO

PRESENTADO POR:

ERIKA ELIZABETH CAZORLA GARCÍA

RIOBAMBA – ECUADOR

2013

AGRADECIMIENTO

Agradezco:

A Dios, por permitirme seguir aquí y lograr todas y cada una de las metas que me he propuesto.

A mi mami Fabiola García, por ser padre y madre a la vez durante tanto tiempo, por saberme guiar, por reprenderme y a la vez por darme todo su amor y comprensión.

A mi papi, Pedro Cazorla, porque a pesar de su ausencia; con sus palabras de aliento, con su amor y apoyo incondicional ha llenado ese vacío, y sé que Dios no va a permitir que nos volvamos a separar, gracias papito porque me enseñó que con esfuerzo todo se puede lograr, pero sobre todo por consentirme tanto y enfrentar a quien sea por mí.

A mis profesores por los conocimientos impartidos.

Al Ing. Mario Villacrés e Ing. Aída Granja, por ser mis guías para lograr este Proyecto de Tesis.

Al Ing. Luis Quinteros, por ser mi amigo y guía incondicional durante las prácticas pre-profesionales y sobre todo en el desarrollo del Proyecto de Tesis.

A todos y cada uno de los trabajadores del área de producción de la Empresa Cemento Chimborazo, por impartirme sus conocimientos y por el apoyo desinteresado durante todo este tiempo.

A la Empresa Cemento Chimborazo, por abrirme las puertas y brindarme todo el apoyo para lograr mi Proyecto de Tesis.

Erika E. Cazorla G.

DEDICATORIA

Dedico mi esfuerzo depositado en la culminación de este proyecto de Tesis a:

Mis padres por ser el pilar fundamental en mi vida, y porque juntos han logrado conseguir los que ahora son nuestro logros.

Mis hermanas por estar siempre a mi lado y brindarme alegría en los momentos más difíciles.

Mi segundo padre Germán Cazorla, por todo el apoyo y cariño que me ha brindado.

Mi abuelita Olguita Logroño, porque siempre quiso esto de mí, que sea una profesional.

Mi abuelita Aída Jurado, por consentirme y quererme como lo hace, pero sobre todo porque mis triunfos y derrotas también son los suyos.

Todos y cada uno de los miembros de mi familia que siempre han estado junto a mí, apoyándome cuando más lo he necesitado.

Mi novio Alvaro Condo, porque siempre ha estado conmigo brindándome su amor y comprensión.

A mi hijito, por ser el motor q mueve mi vida.

Erika E. Cazorla G.

Yo, ERIKA ELIZABETH CAZORLA GARCÍA,
soy responsable de las ideas, doctrinas y
resultados expuestos en esta Tesis, y el
patrimonio intelectual de la Tesis de Grado
pertenece a la “ESCUELA SUPERIOR
POLITECNICA DE CHIMBORAZO”

ERIKA E. CAZORLA G.

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

%	Porcentaje
°C	Unidad de temperatura
ρ_r	Densidad relativa
AC	Relación aire-combustible
Al_2O_3	Óxido de aluminio
C	Carbono
CaCO_3	Carbonato de Calcio
CaO	Óxido de calcio
CH	Hidrocarburos
CH_4	Metano
C_4H_{10}	Butano
C_6H_6	Benceno
Ck	Clínker
CO	Monóxido de carbono
CO_2	Dióxido de carbono
C_2S	Silicato Dicálcico
C_3S	Silicato Tricálcico
Fe_2O_3	Óxido de hierro
g/lit, g/m^3	Unidades de densidad
gal/h	Unidad de flujo volumétrico
gal/Tm	Unidad de flujo volumétrico por unidad de flujo másico

H ₂	Hidrogeno
H ₂ O	Agua
H ₂ S	Sulfuro de hidrógeno
I	Infiltración de aire
Kcal/kg	Unidades de poder calorífico
Kg/lt	Kilogramo por litro
lb, kg	Libra/kilogramo, unidad de masa
l/h	Unidad de flujo volumétrico
m	Unidad de flujo másico
m/s	Metros por segundo
MA	Módulo de alúmina
MgCO ₃	Magnesita
MgO	Óxido de magnesio
Mol, kmol	Mol, kilomol
m ³ /kg	Unidad de volumen
MS	Modulo de sílice
NO	Óxido de nitrógeno
NO ₂	Dióxido de nitrógeno
NO _x	Óxidos de nitrógeno
O ₂	Oxígeno
ppm	Partes por millón, unidad de concentración
rpm	Revoluciones por minuto

S	Azufre
SDC	Saturación de cal
SiO ₂	Óxido de sílice
SO ₂	Dióxido de azufre
T/d	Toneladas por día
T/h	Toneladas por hora
Tm/h	Toneladas métricas por hora

Índice

RESUMEN	I
SUMMARY	II
INTRODUCCIÓN	III
ANTECEDENTES	I
JUSTIFICACIÓN	II
OBJETIVOS	III
<i>OBJETIVO GENERAL</i>	<i>III</i>
<i>OBJETIVOS ESPECÍFICOS</i>	<i>III</i>

CAPITULO I

1 MARCO TEÓRICO	2
1.1 <i>GENERALIDADES</i>	2
1.1.1 MATERIA PRIMA.....	2
1.1.1.1 Caliza.....	3
1.1.1.2 Arcilla.....	3
1.1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO.....	3
1.1.3 EL HORNO ROTATIVO.....	5
1.1.3.1 TRABAJO TÉRMICO REQUERIDO EN UN HORNO ROTATIVO	6
1.1.3.2 PERFIL DE CALOR	6
1.1.3.3 CALENTAMIENTO DE LA ALIMENTACION	6
1.1.3.4 ZONAS DE REACCIÓN EN EL HORNO ROTATIVO	8
1.1.3.5 CIRCUITO DE AIRE EN UN HORNO ROTATIVO.....	11
1.1.3.5.1 El circuito de aire del enfriador.....	12
1.1.3.6 VARIABLES DE CONTROL DEL HORNO.....	17
1.1.3.6.1 Zona de Clinkerización.....	17
1.1.3.6.2 Análisis de los gases de combustión	22
1.1.3.6.3 Control de la tasa de combustible	25

1.1.4.1	FASES DE LA REACCIÓN DE COMBUSTIÓN	27
1.1.4.2	TIPOS DE COMBUSTIÓN	28
1.1.4.2.1	Combustión neutra	28
1.1.4.2.2	Combustión completa	28
1.1.4.2.3	Combustión incompleta	29
1.1.4.3	PRODUCTOS DE LA COMBUSTIÓN.....	30
1.1.4.4	PROCESOS DE COMBUSTIÓN TEÓRICO Y REAL	35
1.1.2.4.1	Proceso de Combustión Teórico	35
1.1.2.4.2	Proceso de Combustión Real	36
1.1.2.4.3	Relación aire combustible	36
1.1.4.5	ANÁLISIS DE GAS PARA LA OPTIMIZACIÓN DE LA COMBUSTIÓN	37
1.1.4.6	TIPOS DE COMBUSTIBLE	38
1.1.4.6.1	Los combustibles sólidos	38
1.1.4.6.2	Los combustibles líquidos	38
1.1.4.6.3	Los combustibles gaseosos	39
1.1.7.1	TIPOS DE ANALIZADORES DE GASES.....	41
1.1.7.2	ANALIZADOR DE GASES PORTÁTIL TESTO 350	41
1.1.7.2.1	Aplicaciones del testo 350	42
1.1.7.3	ANALIZADOR DE GASES PARA INSTALACIONES FIJAS ITECA SOCADEI	43

CAPITULO II

2	PARTE EXPERIMENTAL	47
2.1	<i>MONITOREOS</i>	47
2.1.1	SITUACIÓN ACTUAL DEL HORNO	48
2.2	<i>METODOLOGÍA DE TRABAJO</i>	54
2.2.1	MÉTODOS Y TÉCNICAS	54
2.2.1.1	MÉTODOS.....	55
2.2.1.2.1	Determinación de CaCO₃ (título)	55
2.2.1.2.2	Determinación Química por Rayos X	57
2.3	<i>PUNTOS DE MEDICIÓN</i>	59
2.4	<i>DATOS EXPERIMENTALES</i>	60
2.4.1	DATOS	60
2.4.1.1	Datos mensuales obtenidos durante los 4 meses de estudio (4 de Septiembre del 2012 - 12 de enero del 2013)	60
2.4.1.2	Datos finales resultantes del estudio de los datos anteriores.....	71

2.5	<i>DATOS ADICIONALES</i>	73
2.5.1	DATOS FÍSICOS DEL CONSUMO DIARIO DE COMBUSTIBLE.....	73
2.5.3	DATOS OBTENIDOS CON EL ANALIZADOR DE GASES TESTO 350 EN EL MES DE DICIEMBRE DEL 2012/ENERO 2013, Y DETERMINACIÓN DE LA INFILTRACIÓN EN EL PRECALENTADOR.....	75

CAPITULO III

3 OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE COMBUSTIÓN90

3.1	<i>CÁLCULOS</i>	90
3.1.1	BALANCES DE MATERIA Y ENERGÍA.....	90
3.1.1.1	BALANCE DE MATERIA.....	90
3.1.1.2	BALANCE DE ENERGÍA	92
3.1.1.3	BALANCE DE COSTOS.....	97
3.2	<i>RESULTADOS</i>	100

CAPITULO IV

4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES102

4.1	<i>CONCLUSIONES</i>	102
4.2	<i>RECOMENDACIONES</i>	104

Índice de Tablas

Tabla N° 1	Zonas de Reacción en un Horno Rotativo.....	8
Tabla N° 2	Incremento y Disminución de Gases.....	24
Tabla N° 3	Medición 11-09-2012.....	49
Tabla N° 4	Medición 13-09-2012.....	49
Tabla N° 5	Medición 17-09-2012.....	50
Tabla N° 6	Medición 25-09-2012.....	50
Tabla N° 7	Medición 26-09-2012.....	51

Tabla N° 8	Medición 01-10-2012.....	51
Tabla N° 9	Medición 04-10-2012.....	52
Tabla N° 10	Medición 09-10-2012.....	52
Tabla N° 11	Medición 16-10-2012.....	53
Tabla N° 12	Medición 19-10-2012.....	53
Tabla N° 13	Descripción de los Métodos Empleados.....	55
Tabla N° 14	Parámetros Establecidos.....	60
Tabla N° 15	Datos Obtenidos en el Mes de Septiembre del 2012.....	61
Tabla N° 16	Datos Obtenidos en el Mes de Octubre del 2012.....	63
Tabla N° 17	Datos Obtenidos en el Mes de Noviembre del 2012.....	65
Tabla N° 18	Datos Obtenidos en el Mes de Diciembre del 2012.....	67
Tabla N° 19	Datos Obtenidos en el Mes de Enero del 2013.....	69
Tabla N° 20	Datos Finales.....	71
Tabla N° 21	Consumo de Combustible Físico-Septiembre 2012.....	73
Tabla N° 22	Consumo de Combustible Físico-Octubre 2012.....	73
Tabla N° 23	Consumo de Combustible Físico-Noviembre 2012.....	73
Tabla N° 24	Consumo de Combustible Físico-Diciembre 2012.....	73
Tabla N° 25	Consumo de Combustible Físico-Enero 2013.....	73
Tabla N° 26	Datos Físicos/Producción Mensual.....	74
Tabla N° 27	Medición 05-12-2012.....	75
Tabla N° 28	Medición 13-12-2012.....	76
Tabla N° 29	Medición 14-12-2012.....	77

Tabla N° 30	Medición 17-12-2012.....	78
Tabla N° 31	Medición 19-12-2012.....	79
Tabla N° 32	Medición 20-12-2012.....	80
Tabla N° 33	Medición 24-12-2012.....	81
Tabla N° 34	Medición 26-12-2012.....	82
Tabla N° 35	Medición 27-12-2012.....	83
Tabla N° 36	Medición 02-01-2013.....	84
Tabla N° 37	Medición 03-01-2013.....	85
Tabla N° 38	Medición 07-01-2013.....	86
Tabla N° 39	Medición 09-01-2013.....	87
Tabla N° 40	Medición 12-01-2013.....	88
Tabla N° 41	Parámetros 07-01-2013.....	91
Tabla N° 42	Combustible/Costo.....	97
Tabla N° 43	Comparación Diagnóstico Inicial-Condiciones Finales.....	100

Índice de Figuras

Fig. N° 1	Proceso de Clinkerización.....	V
Fig. N° 2	Reacción Triangular de la Combustión.....	27
Fig. N° 3	Diagrama de Combustión.....	38
Fig. N° 4	Esquema de un Sensor de Monóxido de Carbono.....	42
Fig. N° 5	Esquema Analizador de Gases ITECA SOCADEI.....	44
Fig. N° 6	Torre de Pre calentamiento y Puntos de Medición.....	59

Fig. N° 7	Representación Gráfica Torre de Precalentamiento-Clinkerización-Enfriamiento.....	90
-----------	---	----

Índice de Anexos

ANEXO A	Análisis Químico del Fuel-Oil.....	108
ANEXO B	Certificado Empresa Cemento Chimborazo C.A.....	109
ANEXO C	O ₂ vs Exceso de aire.....	110
ANEXO D	Norma (emisiones al aire para la elaboración de cemento).....	111

Índice de Fotografías

Foto N° 1	Torre de Precalentamiento.....	111
Foto N° 2	Ducto de Succión de Gases del Horno.....	111
Foto N° 3	Toma de Datos-Cuarto de Control.....	111
Foto N° 4	Ventilador 1 o de Tiro.....	111
Foto N° 5	Etapas Torre de Precalentamiento.....	112
Foto N° 6	Etapa 1-Ducto de Succión.....	112
Foto N° 7	Equipo TESTO 350.....	112
Foto N° 8	Sonda de Gases.....	112
Foto N° 9	Unión y Filtro-Sonda de Gases.....	113
Foto N° 10	Conexión TESTO 350-Sonda.....	113
Foto N° 11	Conexión Filtro-Sonda.....	113
Foto N° 12	Preparación Toma de Muestra.....	113

Foto N° 13	Introducción Sonda de Gases.....	114
Foto N° 14	Toma de Muestra.....	114
Foto N° 15	Cabina ITECA SOCADEI.....	114
Foto N° 16	Datos Registrados-ITECA SOCADEI.....	114
Fotos N° 17 y 18	Filtros de Analizador ITECA SOCADEI.....	115
Foto N° 19	Sonda ITECA SOCADEI.....	115
Foto N° 20	Boca de Horno-Sonda Introducida.....	115
Foto N° 21	Salida Sonda ITECA SOCADEI.....	116
Foto N° 22	Controles Analizador.....	116
Foto N° 23	Sonda Taponada.....	116
Foto N° 24	Limpieza Sonda.....	116
Foto N° 25	Operación Analizador.....	116
Foto N° 26	Horno Rotativo.....	116

RESUMEN

La optimización del proceso de combustión en el área de clinkerización mediante la utilización de un analizador de gases en la Empresa Cemento Chimborazo C.A.; promete un beneficio económico y productivo.

Se aplicó el método analítico, para conocer el estado de la materia prima, mediante la determinación de: saturación de cal y módulos, en el laboratorio. Se utilizó el analizador de gases portátil TESTO 350 durante cuatro meses de estudio, con mayor frecuencia en septiembre y octubre 2012 cuando no estaba instalado el analizador fijo; para lo cual fue necesario un estudio previo del mismo. Los monitoreos se realizaron en el ducto de succión de gases de escape del horno. Una vez instalado y puesto en marcha el analizador fijo ITECA SOCADEI en la entrada del horno durante el mes de noviembre 2012, se procedió a tomar los datos registrados por el mismo, y a la vez se utilizó el analizador de gases portátil en los meses de diciembre 2012 y enero 2013 para lograr una comparación de datos y calcular la infiltración de aire en la torre de precalentamiento.

Una vez realizados los cálculos y con el uso de los analizadores; los resultados son:

Diagnóstico Inicial: CO: 1,14%; O₂: 3,58%; NO_x: 0,017%; kcal/kg Ck: 1055,86; gal/Tm Ck: 31,15.

Condiciones Finales: CO: 0,386%; O₂: 2,246%; NO_x: 0,052%; kcal/kg Ck: 957,35; gal/Tm Ck: 28,246.

Concluyo que se redujo el consumo de combustible por tonelada de clínker y las emisiones gaseosas, gracias al uso de los analizadores ya mencionados.

Se recomienda a la empresa mantenerse dentro de los parámetros establecidos para lograr una mejora aún mayor del proceso a más del uso de combustibles alternativos.

SUMMARY

The optimization of the combustion process in the area of clinkerisation through the utilization of a gas analyzer in the Empresa Cemento Chimborazo C.A.; promises an economic and productive benefit.

The experimental research method was applied to learn the status of the raw material by determining: the saturation of calcium nitrate and modules in the laboratory. The TESTO 350 portable gas analyzer was used during four months of study, more frequently in September and October 2012 when the fixed analyzer was not installed; for which a previous research was necessary. The monitoring was performed in the suction duct of the kiln exhaust gases. Once installed and launched the ITECA SOCADEI fixed analyzer at the entrance of the furnace during the month of November 2012, proceeded to take the data recorded of it, and at the same time the portable gas analyzer was used in the months of December 2012 and January 2013 to accomplish a comparison of data and calculate the air infiltration in the preheat tower.

Once the calculations were performed and with the use of the analyzers; the results are:

Initial Diagnostics: CO: 1,14%; **O₂:** 3,58%; **NO_x:** 0,017%; **kcal/kg Ck:** 1055,86; **gal/Tm Ck:** 31,15.

Final Conditions: CO: 0,386%; **O₂:** 2,246%; **NO_x:** 0,052%; **kcal/kg Ck:** 957,35; **gal/Tm Ck:** 28,246.

In conclusion, the fuel consumption per ton of clinker and gaseous emissions was reduced through the use of analyzers.

It is recommended that the company stay within the parameters set to achieve further improvement of the process and the use of alternative fuels.

INTRODUCCIÓN

La presente investigación se realizará en de la planta de producción de la EMPRESA CEMENTO CHIMBORAZO, ubicada en San Juan Chico, Km 14 vía a la Costa, en el proceso de precalentamiento/clinkerización.

El área de precalentamiento-clinkerización, es considerada como la de mayor importancia y es la que valida la capacidad productiva de una planta cementera, ya que para mantener el horno a una adecuada temperatura y tener un clínker en condiciones óptimas y a un costo idóneo, se necesita inyectar combustible (residuo de petróleo) por cada ton de clínker, y cada galón del combustible tiene un costo de 0,72 \$.

A la empresa CEMENTO CHIMBORAZO, le interesa la presente investigación, debido a que una reducción del consumo de combustible por tonelada de clínker producida, representaría un ahorro en los costos de producción, lo cual se logrará mediante el análisis de gases, con la utilización del equipo portátil TESTO 350, y el analizador fijo marca ITECA SOCADEI en la entrada al horno.

Los sistemas de análisis de gas, cuya sonda es colocada en la entrada del horno proporcionan datos esenciales para determinar la eficiencia de la combustión. Las plantas de cemento, necesitan un análisis fiable de los gases en la entrada del horno, si quieren ser competitivas dentro de un exigente mercado. Se utilizan los datos resultantes para:

- ◆ Optimizar su seguridad.
- ◆ Disminuir los gastos operativos.
- ◆ Disminuir los costos de producción.
- ◆ Controlar y reducir las emisiones gaseosas al ambiente.

Entre las consecuencias de no realizar un análisis de gas en la entrada del horno, se pueden mencionar las siguientes:

- ◆ Alto consumo de energía térmica (combustible).
- ◆ Contaminación ambiental.
- ◆ Suspensión no planificada del horno con más frecuencia.

Además se presentarían pérdidas en la producción, y un innecesario desgaste de un costoso equipamiento.

A fin de evitar lo anterior, es conveniente que las fábricas de cemento inviertan en un sistema de análisis de gases en la entrada del horno.

ANTECEDENTES

La Empresa Cemento Chimborazo C.A., está optimizando su proceso de clinkerización por lo que ha realizado varias adquisiciones, entre ellas un analizador de gases portátil marca TESTO 350 y un analizador de gases fijo marca ITECA SOCADEI que será colocado a la entrada del horno. Con estos equipos se va a determinar la eficiencia de la combustión, y el grado de infiltración de aire en el precalentador. La empresa ha dado apertura para que esta investigación se lo realice como mi tema de tesis, a ser desarrollado para obtener el título de Ingeniero Químico.



Figura N° 1 Proceso de Clinkerización

El proceso de clinkerización se realiza de la siguiente manera:

El horno se alimenta con harina cruda (que a su vez proviene de la molienda de las materias primas Caliza y arcilla finamente molidos) a través del precalentador. Dicho horno trabaja a temperaturas de hasta 1.450 °C. El producto final, llamado clínker, sale del horno por el extremo opuesto al enfriador de clínker, y luego una vez frío se somete al proceso de molienda de clínker para la obtención del cemento.

Para producir clínker de alta calidad, se debe controlar la aportación de energía de manera precisa: a una temperatura insuficiente, no se formarán los minerales del clínker y quedará cal libre, mientras que una temperatura excesiva aumenta el consumo de combustible y puede dañar el horno.

Con los datos del análisis de gases en una de las etapas del precalentador siendo la más óptima, la cámara de entrada al horno, pueden determinarse la aportación de energía y las condiciones de combustión óptimas. El objetivo de la aplicación es controlar continuamente la concentración de CO, NO_x, O₂ y, en algunos casos, CO₂ y SO₂, en el interior del horno, lo más cercano al quemador del horno.

También teniendo en cuenta ciertos parámetros como: la temperatura de entrada de la harina cruda y su calidad, y presentándose otras condiciones extremas como son las siguientes:

- ◆ Temperatura del gas: hasta 1700 - 1800 °C
- ◆ Contenido de polvo: hasta 2000 g/m³
- ◆ Concentraciones elevadas de álcali, cloruro y sulfato.

El analizador portátil marca TESTO 350 proporciona sistemas de análisis y de toma de muestras para estas condiciones, utilizando sondas especiales.

El analizador fijo marca ITECA SOCADEI está diseñado para extraer muestras de la combustión de los gases directamente provenientes de la cámara de humos.

JUSTIFICACIÓN

El actual proceso de combustión para la obtención del clínker, implica una preocupación para la Empresa Cemento Chimborazo C.A., en cuanto, a la cantidad de gases que se generan debido a una combustión incompleta, y por lo tanto un excesivo consumo de combustible, lo cual a su vez, implica mayor gasto para la Empresa.

Ante la necesidad de mantener un equilibrio sostenible entre una combustión completa y un consumo de combustible ideal, para de esta manera obtener un clínker de calidad, la investigación propuesta, se desarrolló mediante la aplicación de teoría y conceptos básicos; así como también de un análisis estadístico obtenido a partir de los monitoreos realizados durante cuatro meses consecutivos, y de un análisis de los puntos de infiltración de aire, aire primario, aire secundario y todos los parámetros necesarios para una operación ideal del horno; para de esta manera mejorar el rendimiento del proceso de combustión y controlar la cantidad de gases con lo cual se sabrá que tan completa es la combustión, y así contribuir con la Empresa Cemento Chimborazo C.A..

Por tal motivo, la empresa ha creído conveniente implementar un analizador de gases fijo a la entrada del horno, y de esta manera junto con los monitoreos realizados con el analizador de gases portátil, se pueda obtener datos más confiables y llegar a una conclusión más adecuada.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Optimización del proceso de combustión, en el área de clinkerización mediante la utilización de un analizador de gases, para determinar el porcentaje óptimo de los gases (CO , O_2 y NO_x) que se generan en una combustión completa y relacionarlo con el consumo de combustible; mediante la variación de algunos parámetros de operación del horno (velocidad del ventilador de tiro, combustible, carga).

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ◆ Diagnosticar la situación actual del horno.
- ◆ Determinar los parámetros necesarios para la obtención de un clínker en óptimas condiciones.
- ◆ Determinar los puntos de medición.
- ◆ Determinar la infiltración de aire (pérdida de combustible) en la torre.
- ◆ Reducir el consumo de combustible por tonelada de clínker.
- ◆ Optimizar la combustión, para determinar el aire justo y aire en exceso.
- ◆ Determinar la disminución en el consumo energético.

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

CAPITULO I

1 MARCO TEÓRICO

Con la perspectiva de lograr una mejora en el proceso de combustión y conseguir datos confiables, mediante la utilización del analizador de gases portátil y del analizador de gases fijo; la Empresa Cemento Chimborazo C.A., tiene el interés de lograr una optimización del proceso mencionado, para así producir clínker en óptimas condiciones.

Por esta razón, el enfoque teórico en función del objeto investigativo, es la descripción y estudio de los aspectos generales involucrados en el proceso de combustión; área de clinkerización, y de esta manera poder lograr su optimización y otorgar un beneficio operativo y económico para la Empresa Cemento Chimborazo C.A.

A continuación se definen conceptos involucrados en la investigación.

1.1 GENERALIDADES

1.1.1 MATERIA PRIMA

El proceso de fabricación del cemento comienza con la obtención de las materias primas necesarias para conseguir la composición adecuada de óxidos metálicos para la producción de clínker.

La materia prima básica para la fabricación de clínker es principalmente el crudo, que está formado por:

- Un aporte de carbonato de calcio (CaCO_3): generalmente caliza (92%). Encargada de aportar el óxido de calcio (CaO) que luego reaccionará en el horno para formar los silicatos, que son los componentes realmente activos en el clínker.
- Un aporte de fundentes: generalmente arcilla (8%). Encargada de aportar los óxidos que funcionan como fundentes y que contribuyen a la formación de fase líquida en el horno facilitando las reacciones.

1.1.1.1 Caliza

La caliza es una roca sedimentada que consiste principalmente en carbonato de calcio (CaCO_3), en general en la forma de su modificación más estable: la calcita. Junto a ésta, contiene con frecuencia carbonato de magnesio, óxidos de aluminio y hierro combinados en forma de carbonatos y silicatos, que son compuestos de naturaleza biógena o precipitación química.

1.1.1.2 Arcilla

La arcilla es la segunda materia prima en importancia para la obtención de clínker ya que cuando la caliza empleada no contiene suficiente alúmina y sílice, es necesaria la adición de material arcilloso. Las arcillas están formadas principalmente por hidrosilicatos de alúmina, sin embargo, exhiben una amplia variación en su composición mineralógica y química. Varían desde las compuestas exclusivamente por silicatos de aluminio (blancas), hasta las que pueden contener más de 50 % de sílice libre, o contener hidróxido de hierro, sulfuro de hierro, carbonato de calcio, etc. El óxido de hierro es el componente colorante más frecuente de las arcillas. Puesto que la granulometría es importante, se prefiere la presencia de sílice finamente dividida.¹

1.1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

En el proceso por vía seca el crudo, se introduce en el horno en forma seca y pulverulenta.

Éste se prepara mediante el secado y molido de las materias primas en el molino de bolas, haciendo uso de los gases de escape calientes del horno para secado.

Posteriormente se homogeniza y/o mezcla en silos mediante sistemas continuos o por lotes. El material crudo finamente molido y homogeneizado, previamente a su entrada en el horno, se precalienta hasta una temperatura de aproximadamente 760-800 °C. En hornos de precalentamiento en suspensión, el crudo alimenta a una serie de ciclones, se introduce por la etapa de ciclones superior, descendiendo hacia los ciclones inferiores en contracorriente con los gases calientes de la combustión. Este contacto en suspensión del crudo con

¹ **Prontuario del Cemento**
OTTO LABAHN, 5ta Edición Española, España, 1985

los gases provoca un eficiente intercambio de calor, posibilitando que la harina entre al horno parcialmente calcinada (a unos 800 °C) mientras que los gases salen del intercambiador a una temperatura de unos 400 °C aportando parte de este calor residual al secado de las materias primas en su paso por el molino de crudo. Finalmente los gases se dirigen al filtro de mangas para su depuración.

Tanto el polvo recogido en el filtro de mangas principal, como el recogido en el filtro de mangas de los silos de crudo, es reintroducido en el proceso, ya sea con las materias primas, vía quemador con el combustible, o añadido al molino de cemento.

Se puede obtener un aumento considerable de la capacidad de producción de clínker con el empleo de hornos con precalcinador en los que se sitúa un segundo dispositivo de combustión entre el horno y la sección del precalentador. En el precalcinador, se puede quemar hasta el 60 % del combustible total del sistema del horno. Los sistemas de horno con precalentador y precalcinador de ciclones de 5 a 6 etapas se consideran la tecnología estándar para las nuevas plantas, pues las etapas adicionales de ciclones mejoran la eficacia térmica. El precalentador de Cemento Chimborazo tiene cuatro etapas de ciclones.

La harina que entra al horno se calcinará completamente pasando por diferentes zonas hasta llegar a una temperatura aproximada de 1450-1500 °C, allí se producirán las reacciones químicas más importantes en el crudo y la formación de clínker, esta zona se conoce como de clinkerización.

La reacción de clinkerización se realiza bajo condiciones oxidantes, por lo que se requiere un exceso de aire en la zona de clinkerización del horno.

El clínker que sale del horno es enfriado rápidamente con aire frío para bajar su temperatura de 1200 °C a 80 °C, asegurando el estado vítreo, el clínker se almacenará en el patio de clínker para su posterior uso. ²

² **Manual de prevención de la contaminación en el sector cementero. CAR/PL, Primera Edición, Barcelona, 2008**

1.1.3 EL HORNO ROTATIVO

Los hornos rotativos son usados para el calentamiento de sólidos hasta el punto en que se produzca la reacción química deseada. El horno rotativo consiste básicamente en un cilindro rotatorio inclinado. El tiempo de retención de sólidos en el horno es un importante factor del proceso y es determinado por la adecuada selección de diámetro, longitud, velocidad, inclinación y proyecto de su interior. Casi todos los clínker de cemento se producen en grandes sistemas de horno rotativo.

El horno rotativo es un caparazón cilíndrico resistente de acero equipado con un accionamiento eléctrico para convertir su velocidad a 1-3 rpm, a través del cual el flujo de los gases calientes de combustión están en contracorriente con las materias primas.

El horno puede ser alimentado con carbón, petróleo, gas natural de residuos, o una combinación de estos combustibles. El horno de la Empresa Cemento Chimborazo utiliza como combustible residuo de petróleo.

Hay cuatro tipos de hornos: hornos largos húmedos, hornos largos secos, hornos con precalentador y hornos con precalcificación. Los hornos largos húmedos y secos y la mayoría de los hornos de precalentamiento sólo tienen una zona de combustión de combustible. En el caso de Cemento Chimborazo es un horno con precalentamiento.

Debido a las temperaturas típicas de operación de estos hornos son diferentes, los mecanismos de formación de NO_2 también difieren entre estos tipos de hornos. En una zona de combustión primaria en el extremo caliente de un horno, las altas temperaturas llevan a la formación de NO_2 . La eficiencia energética también es importante en la reducción de emisiones de NO_2 , por ejemplo, una alta eficiencia térmica significa menos calor y el combustible se consume y, por tanto, menos NO_2 se produce.³

³ Hornos Rotatorios
<http://www.metso.com/es/miningandconstruction/mineriyayconstruccion.nsf>

1.1.3.1 TRABAJO TÉRMICO REQUERIDO EN UN HORNO ROTATIVO

Hay una cantidad fija de trabajo térmico que debe ser realizado dentro del horno para obtener el clínker. Este proceso térmico está acompañado de varias etapas. Es decir que tiene que ser suministrada una cantidad mínima de temperatura (calor) a la capa de alimentación, de tal manera que se formen las fases adecuadamente.

1.1.3.2 PERFIL DE CALOR

Las temperaturas difieren a través del horno y a través del precalentador, un factor muy importante es la diferencia de temperatura entre el material de entrada (crudo) y los gases en cualquier punto en el horno. La temperatura registrada correspondiente al gas, nunca corresponde a la temperatura del material en la misma localización. También las condiciones podrían variar de tal forma que las temperaturas de los gases, podrían mostrar un cambio considerable, pero la temperatura del material permanece invariable hasta después de varios minutos. Esto se aplica a la conducta de la capa de alimentación dentro del horno rotativo mismo, puesto que el horno rotativo es en sí, un intercambiador de calor relativamente ineficiente.

1.1.3.3 CALENTAMIENTO DE LA ALIMENTACION

La transferencia de calor desde los gases del horno a la capa de alimentación ocurre solamente en la superficie de la capa que está expuesta al gas. Luego la temperatura de la capa es más baja en el centro y más alta en la superficie. En la zona de quema o clinkerización, la alimentación del horno está ahora en una condición pegajosa, en un estado constante de agitación, ayudado por una costra desigual y rugosa, se eleva a lo largo del movimiento lateral del horno, luego regresa. A causa de esta acción, la capa superficial está constantemente siendo regresada dentro de la masa de la alimentación, donde las partículas calientes transfieren calor a las partículas más frías por conducción.

Mientras tanto las nuevas partículas están siendo expuestas a la radiación desde los gases calientes y el proceso es repetido continuamente. En la zona y hacia el extremo de la entrada del horno, donde la superficie del revestimiento

es mucho más suave y la alimentación es todavía más o menos fluida, la capa es girada muy poco, según se desliza en un curso de zig-zag hacia abajo del horno.

La capa primero es levantada por la pared del horno, luego cuando alcanza cierta altura, se desliza hacia abajo y sigue así sin girar. El calor se transfiere desde la pared del horno a la alimentación. La llama irradia calor a la costra que esta adherida al horno. Parte del calor es luego irradiada a la capa, y parte es transferida a la capa por conducción cuando la pared gira dentro de la capa. La temperatura de la pared es más baja cuando emerge desde la capa más alta inmediatamente después de que llega a estar en contacto con la capa de la alimentación.

Es importante además, la relación entre el efecto de la pared descrito antes y la velocidad de rotación del horno, si la velocidad es más alta, será más favorable que las velocidades más bajas para el intercambio de calor a causa de la diferencia de temperatura más pequeña entre la pared del horno y la capa de alimentación.

En los ciclones de los precalentadores esta relación trabaja de manera diferente (temperatura gas - material). Aquí el intercambio de calor tiene lugar más rápidamente y por supuesto la diferencia entre estas dos es mucho más pequeña. En el horno de proceso seco, la cantidad total de calor para la descarbonatación debe ser transferida a la alimentación dentro del horno mismo, puesto que este es ineficiente para la transferencia de calor, debe ser extremadamente largo y ancho.

En un horno con precalentador, la alimentación es calcinada en un 30-35% en la torre del precalentador, y luego requiere mucho menos calor, que dentro del mismo horno rotativo. Esto hace posible obtener ya sea altas tasas de producción en los hornos de igual tamaño o mantener la misma tasa de producción dimensionando hornos mucho más pequeños.

En el horno, la capa del material sigue prácticamente sin obstáculo a lo largo del fondo del horno, donde los gases primeramente calientan solo la capa

superficial del lecho. De aquí que el contacto entre el material y el gas, el intercambio de calor es relativamente ineficiente y toma un largo tiempo completarlo. Un horno de proceso seco requiere aproximadamente 45 m para conseguir el 90% de la calcinación y la alimentación le toma más de una hora viajar a través de esta sección del horno rotativo. ⁴

1.1.3.4 ZONAS DE REACCIÓN EN EL HORNO ROTATIVO

El control de la operación del horno significa mantener una mirada en todas las diferentes zonas y reacciones que tienen lugar dentro del sistema del horno. Ninguna de estas zonas pueden ser negadas o ignoradas si el horno es operado adecuadamente. Hay cinco zonas distintas dentro del horno, su localización y longitud son diferentes para cada tipo de horno usado. Estas zonas se muestran en la siguiente tabla:

Tabla N° 1 Zonas de Reacción en el Horno Rotativo

	RANGOS DE TEMPERATURA DEL MATERIAL (°C)
Zona de secado y de precalentamiento	15 – 805 °C
Zona de calcinación	805 – 1200 °C
Zona de transición superior	1200 – 1400 °C
Zona de clinkerización	1400 – 1510 °C
Zona de enfriamiento (zona de transición inferior)	1510 – 1290 °C

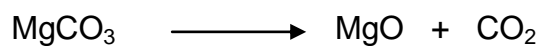
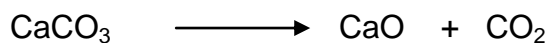
Fuente: The Rotary Cement Kiln KURT E. PERAY, Segunda Edición, USA, 1986

⁴ The Rotary Cement Kiln
KURT E. PERAY, Segunda Edición, USA, 1986

Se define como zona de clinkerización a las zonas de: transición superior, sinterización y transición inferior. La zona de quema es el área en el horno donde la costra de clínker existe en la superficie del refractario.

En la zona de secado y de precalentamiento se remueve toda el agua libre en la alimentación y la temperatura de la alimentación es subida a aproximadamente 800 °C en la cual la temperatura de calcinación empieza. Durante el secado, la temperatura de la alimentación se mantiene en 100 °C hasta que toda la humedad libre es removida. Empezando a una temperatura de 550 °C el agua químicamente combinada de los minerales de arcilla es también eliminada. Luego, en esta zona particular las reacciones que tienen lugar en sucesión son: elevar la temperatura de la alimentación hasta la temperatura de evaporación, evaporación del agua libre, liberación del agua combinada y elevación a la temperatura de calcinación.

Desde el punto de vista del operador, la zona de calcinación, es la zona más importante, la cual regula los eventos subsecuentes en la zona de clinkerización. La calcinación es la reacción por la cual el dióxido de carbono es sacado de los carbonatos de calcio y de magnesio, dejando cal libre y oxido de magnesita:



El dióxido de carbono se disocia desde la alimentación y es llevado hacia afuera por los gases del horno.

La alimentación del horno que no esté completamente calcinada antes de que entre a la zona de clinkerización, dificulta la quema y es una de las principales razones para las condiciones de anormalidad del horno. Luego, la calcinación completa de la alimentación antes de que entre a la zona de clinkerización es esencial para el quemado adecuado del clínker.

La formación de cal libre en la zona de calcinación es acompañada por una correspondiente reducción del contenido de CaCO_3 (carbonato de calcio) en la alimentación.

El área en donde la calcinación y las formaciones de fase intermedias, se traslapan una a otra. Algunas de las partículas más finas, o las que fueron expuestas más favorablemente a los gases calientes sobre la superficie de la capa de alimentación, pueden alcanzar calcinación completa y empezar a reaccionar con alúmina, sílice o el óxido de hierro, para formar estos compuestos intermedios. Con otras partículas, la calcinación no sería terminada y luego no se empezaría la formación de la fase líquida. Esta área se conoce como zona de transición superior. Esta es identificada como la tercera parte superior del área en donde la costra del clínker es formada en el horno. Esta área es localizada dentro del horno, directamente detrás de la llama donde la capa de alimentación tiene un color oscuro.

La zona de sinterización o clinkerización, es donde las etapas finales de la formación de los compuestos de clínker tienen lugar. Las fases interinas inestables tales como C_5A_3 y C_2F se combinan con más cal libre para formar el compuesto C_3S . La sinterización en el corazón de la zona de quema es un proceso exotérmico y tiene lugar en la parte central de la zona de quema directamente bajo la parte iluminada de la llama. Es aquí donde la conducta más viscosa de la capa de clínker puede ser observada cuando las temperaturas del material están más altas.

La zona de enfriamiento (transición inferior), usualmente abarca con pocas excepciones, los últimos 3 – 6 m del extremo de descarga del horno. Contrariamente a los conceptos populares errados, el proceso de formación de clínker no se completa cuando el material ha pasado al área más caliente. La manera en la cual el clínker es grandemente enfriado, afecta su calidad. Dependiendo de la localización de la llama, del enfriamiento, por ejemplo, la solidificación de los compuestos parcialmente líquidos, pueden ser ya sea lento o rápido.

El enfriamiento rápido beneficia tanto a la calidad del clínker, como a su molturabilidad. Para rápido enfriamiento, la zona de sinterización está muy cerca del extremo de la descarga; luego el clínker descarga desde el horno a una temperatura de cerca de 1370 °C. Tan pronto como entra en el primer compartimiento frío del enfriador, es rápidamente enfriado. Inversamente, cuando la zona de quema está localizada muy lejos hacia arriba, el clínker reside por más tiempo en la zona de transición inferior, siendo lentamente enfriado, y luego descargado desde el horno a una temperatura de alrededor de 1200 °C. ⁵

1.1.3.5 CIRCUITO DE AIRE EN UN HORNO ROTATIVO

El movimiento del aire a través del horno puede ser considerado, para todos los propósitos prácticos, que tiene lugar uniformemente desde la introducción de aire a través del enfriador a la descarga final en la chimenea. El estado físico del aire sufre cambios en temperatura, volumen y presión mientras está atravesando el horno, debido a que la composición química del aire mismo cambia en el proceso, y los espacios a través de los cuales viaja el aire no son uniformes a través del sistema.

Es usual dividir este flujo de aire dentro de tres circuitos sucesivos en el siguiente orden:

- ◆ El circuito para enfriamiento del clínker e introducción del aire de combustión dentro del horno. Este es el circuito del enfriador.
- ◆ El circuito en el cual tiene lugar la combustión, calcinación y secado. Este es el circuito del horno.
- ◆ El circuito en el cual el aire y los gases son sacados del horno y pasan a través del circuito de las unidades de recuperación de calor y de los colectores de polvo. Este es el circuito de descarga.

En consideración al circuito de aire en el horno, es necesario mirar las tres divisiones como un todo porque uno lleva naturalmente al próximo. El concepto total de flujo de aire es uno de una unidad completa, tal que cualquier cambio o

⁵The Rotary Cement Kiln
KURT E. PERAY, Segunda Edición, USA, 1986

ajuste en un circuito afectara un cambio en el circuito entero. Otro factor importante es que, es casi imposible evitar la entrada del aire falso dentro del sistema de horno. Este aire entra a través de aberturas mal cerradas alrededor de la caperuza del horno y alrededor de los ductos del extremo de la entrada. No solamente se corta la eficiencia del ventilador de tiro inducido, sino que el aire frío que está entrando a través de la caperuza, reduce la eficiencia de la combustión. Cambios drásticos en el flujo de aire tienen lugar cuando las puertas en cualquier parte del sistema son dejadas abiertas por un periodo de tiempo prolongado, porque este podría llevar a condiciones de disturbiamiento del horno.

1.1.3.5.1 El circuito de aire del enfriador

El enfriador de clínker realiza dos funciones: debe enfriar el clínker caliente descargado desde el horno y suministrar al horno con el aire secundario necesario para la combustión. Haciendo así, un valioso calor desde el enfriador es recuperado y entra al clínker como aire secundario caliente. Los enfriadores de clínker más usados son:

- ◆ Enfriadores reciprocantes de parrilla inclinada.
- ◆ Enfriadores planetarios.
- ◆ Enfriadores de parrilla de desplazamiento continuo.
- ◆ Enfriadores rotativos.

El enfriador reciprocante de parrilla inclinada, es el tipo más ampliamente usado hoy en día. Este tipo de enfriador deriva su nombre del movimiento reciprocante (atrás y adelante) de las filas de parrillas del enfriador que empujan al clínker al extremo de descarga. Este enfriador no se desempeña adecuadamente cuando el clínker es muy fino como es el caso en que el horno está en una condición de disturbiamiento.

La transferencia de calor en el primer compartimiento es de 30 a 40 veces más eficiente que la transferencia de calor en los compartimientos más bajos. Se debe asegurar que el aire este adecuadamente aplicado en esa parte del enfriador donde puede hacer el mayor trabajo térmico. Esto llega a ser

especialmente importante en situaciones donde el enfriador exhibe muy altos volúmenes de exceso de aire que deben ser venteados a la atmosfera. Lo mismo debe ser aplicado cuando el enfriador de clínker consistentemente descarga clínker insuficientemente enfriado que produce temperaturas altas para la molienda final y que podrían conducir a problemas en el control de calidad del cemento. Se pueden presentar daños en los componentes del enfriador cuando el flujo de aire a los compartimientos individuales del enfriador no es ajustado adecuadamente a las condiciones de operación prevalecientes.

1.1.3.5.2 El circuito de aire en el horno rotativo

La cantidad de aire que es llevado a través del horno rotativo, es regulado y controlado solamente por el ventilador de tiro inducido. El origen del aire que va por el horno es:

- ◆ El aire secundario que emana directamente del enfriador.
- ◆ El aire primario calentado moderadamente que entra a través del inyector del quemador.
- ◆ El aire parásito o aire falso que entra a través de las aberturas en el área de la caperuza.

Los objetivos finales son:

- ◆ Introducir una máxima cantidad de aire secundario.
- ◆ Usar solamente la mínima cantidad de aire primario seguro, que es necesitada por el combustible y el control de la llama.
- ◆ Remover o reducir la presencia del aire parásito.

Por cada libra de aire frio que ingresa a través de estos puntos de infiltración innecesarios en la caperuza, hay una correspondiente libra de valioso aire secundario caliente de alrededor de 800°C que no será utilizado por el horno. Como resultado se tiene que un volumen más alto de aire en exceso del enfriador tiene que ser venteadado dentro de la atmósfera. La temperatura de este aire esta también siendo incrementada resultando en el desperdicio de calor valioso. Se debe tratar de estabilizar el flujo de aire a través del horno, a

menos de que el tiro del horno este controlado dentro de límites razonables, nunca se puede obtener un flujo de combustible uniforme y condiciones estables de quema.

Una cierta cantidad definida de aire es requerida para la combustión completa en el horno, lo cual significa que el control cerrado sobre la relación de combustible – aire, tiene que ser ejercida. La combustión incompleta, causada por la admisión de muy poco aire, resulta en la pérdida de algún carbón no quemado porque una porción del carbón del combustible es quemado a monóxido de carbono (CO) en lugar de dióxido de carbono (CO₂). Para asegurarse de que esto no se produzca, una pequeña cantidad de exceso de aire (aproximadamente el 5%) es introducida dentro del horno. Por otro lado, cantidades muy grandes de exceso de aire pudiera llevar a serias pérdidas de calor a causa de este aire, no necesitado para la combustión, eleva la temperatura de los gases de combustión que salen por atrás. Esta elevación de la temperatura a su vez afecta el perfil de calor en el horno, a causa del cambio en el secado, calcinación y condiciones de la zona de clinkerización. Una vez que se ha estabilizado la operación del horno, las siguientes reglas básicas deben ser aplicadas a fin de mantener el horno en tal condición:

- ◆ A condiciones de combustión completa deben prevalecer todo el tiempo mientras el horno este en operación, luego los cambios en las tasas de combustible y de aire pueden ser tomados solo en la extensión que no resulte formación de CO, después que las tasas has sido cambiadas.
- ◆ La máxima cantidad de exceso de aire presente en el horno no debería exceder la cantidad que causará pérdidas de calor en la parte trasera o sobrepase el límite predeterminado.
- ◆ Las temperaturas del aire que ingresan al horno y que salen del mismo deberían ser mantenidas lo más constantemente posibles a fin de no perturbar el perfil de calor del horno.

Por cada unidad de peso de combustible quemado (lb o kg) se requieren aproximadamente 10,5 unidades (lb o kg) de aire. El aire en las condiciones estándar, tiene un volumen específico de aproximadamente 0,7735 m³/kg. Los

gases producidos durante la combustión viajan hacia la parte trasera del horno y son enriquecidos con:

- ◆ CO₂ que también proviene de la calcinación de la alimentación.
- ◆ Agua de la evaporación de la humedad en la alimentación.
- ◆ Constituyentes volátiles (azufre y álcalis).
- ◆ El polvo involucrado dentro del sistema.

Las tasas de flujo de gas pueden ser calculados basados en parámetros teóricos o por medición de los flujos. Sin embargo, las mediciones, particularmente en los flujos de los gases de escape del horno, siempre sujetos a sospecha, a menos que se sujeten y practiquen estrictamente a las reglas de medición, porque usualmente no hay medios precisos para determinar el tamaño de las costras del ducto. Es importante calcular las tasas de flujo teóricas así como también comprobar que los valores medidos se acerquen a los resultados teóricos.

1.1.3.5.3 El circuito de aire de descarga

Cuando los gases dejan el sistema del horno (torre de precalentamiento), hay que retirar el polvo de estos gases antes de que ellos puedan ser ventados a la atmósfera. Se instalan para este propósito: multiciclones, ciclones, precipitadores electrostáticos, y/o filtros de mangas. Se dice que generalmente todas estas unidades causan una apreciable pérdida de presión en la corriente del gas, que hace indispensable instalar ventiladores de tiro inducido de gran capacidad.

El ventilador de tiro está diseñado para manipular los gases calientes del horno que se producen durante las condiciones normales de operación. Si el ventilador es forzado para mover un volumen igual de gas relativamente frío, podría ser sobrecargado porque el gas frío tiene una densidad más alta que el gas caliente. Por esta razón, las tablas para velocidades máximas de ventilador a varias temperaturas de los gases de escape tienen que ser suministrados al operador.

La humedad y el contenido de azufre en los gases requieren que esta temperatura sea controlada dentro de un rango predeterminado. Si la temperatura cae bajo el punto de rocío de los gases, la humedad puede precipitarse en el filtro de mangas, causando problemas de taponamiento y ataque químico (corrosión). Las mangas del filtro también tienen una temperatura de servicio máxima sobre la cual las mangas pueden ser dañadas. La mayoría de los filtros de mangas requieren que los gases que pasan a través de ellos no excedan los 285 °C. El punto de rocío de los gases varía dependiendo de las condiciones locales prevalecientes. La mayoría de los sistemas de hornos tiene que operar a temperaturas de entrada al colector de polvo dentro del rango de 160 – 285 °C, para evitar problemas de operación. Estas temperaturas se aplican a la entrada al colector de polvo, no a la temperatura de los gases de escape del horno, ni a los gases de escape de la torre de precalentamiento.

Se pueden cuestionar las antes mencionadas temperaturas del punto de rocío, ya que el punto de rocío de los gases de escape del horno normalmente está entre 50 – 90 °C. Esto se debe a la infiltración de aire en el mismo colector. Los gases del horno están siendo enfriados posteriormente dentro de estas unidades tanto como 60 °C lo que puede traer a estos gases cerca del punto de rocío aun cuando ellos entran a temperaturas mucho más altas.

Otro factor que debe ser considerado con respecto al aire del circuito de descarga es la infiltración de aire entre la salida del horno y el colector de polvo. Esta infiltración debería mantenerse en un mínimo por medio de un sellado efectivo de todas las aberturas innecesarias. Estas aberturas disminuyen la capacidad del ventilador de tiro inducido, ya que requiere energía adicional para el motor de este ventilador, y podría caer la temperatura de gas debajo de la temperatura previamente discutida, el peligroso punto de rocío. Puede ser calculado que alrededor del 25% de aire infiltrado en el circuito de descarga puede incrementar los requerimientos de potencia del ventilador de tiro por una cantidad aproximadamente igual al 25%, lo que significa que es una ineficiencia significativa del sistema. Sellando las puertas y aberturas

dentro de los ductos de gas no es difícil, pero, obtener un sello efectivo en la parte trasera del horno es usualmente asociado con costos de instalación y de mantenimiento altos, lo cual sería justificado debido a que se reducirá los requerimientos de potencia del ventilador de tiro.

La cantidad de infiltración de aire en el circuito de descarga puede ser medida por la extracción y análisis simultáneo en los gases de escape del horno y en los gases de entrada al colector de polvo. El porcentaje de infiltración de aire es luego calculado por la siguiente ecuación:

Ec. N° 1

$$I = \frac{OX_f - OX_o}{20,9 - OX_f} * 100$$

Donde:

I: porcentaje de aire infiltrado (por volumen).

OX_f: porcentaje de oxígeno en la entrada al colector de polvo.

OX_o: porcentaje de oxígeno en la entrada al horno.

Pueden seleccionarse otros dos puntos cualesquiera de muestreo en el sistema, como la salida del colector de polvo; para determinar la infiltración. ⁶

1.1.3.6 VARIABLES DE CONTROL DEL HORNO

1.1.3.6.1 Zona de Clinkerización

La temperatura en la zona de clinkerización no es solamente una de las más importantes variables de control del horno, sino que también es una de las más difíciles de monitorear. Se requiere de un vigoroso entrenamiento para observar visualmente y evaluar la zona de clinkerización, esta capacidad para inspección visual es un requerimiento indispensable porque hay veces donde estos instrumentos están fuera de servicio. La verificación visual se necesita

⁶ Manual Tecnológico del Cemento
DUDA W., Segunda Edición, España, 1976

también cuando las lecturas instrumentales son cuestionables debido a la interferencia del polvo en el ambiente de la zona de clinkerización.

La función de este control no es solamente un chequeo para ver si un buen clínker está siendo quemado; sino también es una evaluación del clínker, de la costra, de la llama, de la corriente de aire. El color es muy importante para evaluar el clínker, la costra y la llama. La conducta general del clínker, de la corriente de aire, y de la llama pueden ser estudiadas, así como la forma de la llama y la costra, y el tamaño del clínker que se está descargando.

◆ **Aparición del clínker**

Una prueba rápida, aunque no muy precisa, es chequear el color y tamaño del clínker por observación. Solo el tamaño del clínker no nos da una verdadera indicación de la calidad del clínker ya que el tamaño del mismo es influenciado por factores como la composición de la alimentación y la velocidad del horno. Generalmente, un clínker bien quemado es oscuro, casi negro. Si el clínker más caliente es quemado, vienen los nódulos de clínker más grandes.

Si el clínker está sobre quemado (quemado más caliente), el contenido de cal libre cae, el peso litro es más pesado, el clínker tiene tamaño más largo, más denso (menos poroso), y más oscuro en color, comparado con un clínker que no está sobre quemado.

Inversamente un clínker sub quemado (quemado más frío) causa que el contenido de cal libre se incremente, y el peso litro baje. También el clínker es más pequeño en tamaño (polvoriento), mas poroso, y el color es más luminoso, más cercano al café.

Considerando al clínker en la zona de clinkerización, para lo cual es necesario la observación visual. La alimentación del horno, cuando alcanza las temperaturas de clinkerización, sufre cambios drásticos en

sus características físicas y químicas. Tan pronto como la formación líquida de los constituyentes empieza, la alimentación viene a ser más sluggish a causa de las reacciones químicas que tienden a hacer a la alimentación más suave y viscosa. La formación de bolas (clinkers) empieza, y el material comienza a rodar más alto con la pared que se eleva del horno. En lugar de deslizarse hacia abajo la pared, la capa de alimentación empieza a formar una cascada sobre ella misma, se notara un incremento de la alimentación sluggishness a temperaturas más altas, la alimentación will climb mas alto sobre la pared del horno, con cascadas mas turbulentas. Asumiendo que otras variables permanecen constantes, las bolas de clínker más grandes serán formadas a temperaturas más altas.

◆ **El aire de combustión desde el enfriador**

Considerando que solo la apariencia del aire que viene del enfriador está bajo condiciones normales de operación, no es necesario tomar muy en cuenta a este factor porque la apariencia permanece cercanamente constante.

Cuando un clínker insuficientemente quemado, es permitido que entre al enfriador, la corriente de aire lleva una gran cantidad de partículas de polvo fino dentro del horno que puede obstruir la visibilidad en la zona de clinkerización, además la temperatura del aire secundario es más baja, causando un cambio en la estructura de la llama, que resulta en que el punto de ignición del combustible se mueve dentro del horno. Las condiciones de combustión son pobres (llama fría) a causa de que el polvo está atrapado en la atmosfera de la zona de clinkerización.

Todas estas condiciones pueden hacer que la zona de clinkerización parezca al ojo ser “fría”, aunque esto no siempre sucede. El área de la zona de más alta intensidad podría ya haber alcanzado la temperatura de clinkerización nuevamente aunque el frente este todavía negra y fría.

◆ **Color de la costra**

El color de la costra muestra como están las condiciones de la temperatura en la zona de quema. Bajo condiciones normales, el color de la costra en el área más caliente está entre rangos que van del amarillo al blanco. Cuando el color cambia de tomate a rojo, la zona se está enfriando; si el cambio es a blanco, la zona de quema se está calentando.

Una gran cantidad de calor es transferido a la alimentación por conducción y radiación desde la chapa del horno, la temperatura de la costra es muy importante para el proceso de quema, debido a que la costra actúa como un almacenamiento de calor en la zona de clinkerización, teniendo una costra caliente, que puede evitar una avalancha de alimentación. Si la costra pierde temperatura rápidamente, a la vez que una carga pesada de alimentación entra a la zona de quema, la única alternativa sería bajar la velocidad del horno para evitar producir un clínker malo.

El color de la costra, la apariencia de la costra también son importantes. Se debe tratar de detectar manchas débiles, pérdida de costra, formación de anillos en la zona de quema, la detección temprana es de vital importancia cuando tiene lugar un cambio en la estructura de la costra. Se debe mantener o reconstruir la costra para proteger al refractario y a la chapa del horno de daño por sobrecalentamiento.

Cuando la zona de quema está llegando a ser tan sobrecalentada que el clínker empieza a formar bolas o aun peor, empieza a licuarse. Esta condición es extremadamente dura sobre la costra, llegando a ablandarse (licuarse), empieza a caerse. Si esto sucede, se debe desatender la producción de un buen clínker y concentrarse en la protección del refractario y de la chapa del horno.

Es importante inspeccionar visualmente los cambios en la zona de quema, para ver los cambios en los siguientes puntos:

- ◆ Color del clínker.
- ◆ Tamaño del clínker.
- ◆ Acción de cascada de la capa de clínker en la vecindad de la llama.
- ◆ Apariencia de la capa de alimentación detrás de la llama.
- ◆ Posición de la alimentación oscura.
- ◆ Apariencia del aire secundario que viene del enfriador.
- ◆ Condiciones del enfriamiento.
- ◆ Forma y color de la llama.

La quema de clínker no es solamente una función de adicionar combustible cuando la zona de clinkerización se está enfriando o inversamente, reducir combustible cuando la zona de quema está caliente.

Puesto que es difícil medir la temperatura de la zona de quema con pirómetros, muchos métodos han sido tratados de relacionar con otras variables del horno con posibles cambios en esta temperatura en la zona de quema.

El método más reciente es respecto al monitoreo del contenido de NOx en los gases de escape del horno y relacionado a este con los cambios en la temperatura de la zona de quema.

El quemado del horno es una manera de detectar algunos cambios pertinentes tan tempranamente como sea posible y haciendo los ajustes en pequeñas etapas.

Los indicadores más apropiados para controlar los cambios en la temperatura de la zona de quema son:

- ◆ Amperaje de accionamiento del horno.
- ◆ El Contenido de oxígeno en los gases de escape (provistos por la tasa de combustible y la velocidad del ventilador de tiro que permanecen invariables).
- ◆ La temperatura de la entrada del horno en un tiempo que iguala el tiempo de viaje de la alimentación desde la respectiva termocupla a la entrada de la zona de quema.
- ◆ El contenido de NOx en los gases de escape.
- ◆ El contenido de CO₂ en los gases de escape.
- ◆ El tiro en la entrada del horno.

Estos constituyen las principales lecturas de detección temprana que alertan sobre los cambios en la temperatura de la zona de quema.⁷

1.1.3.6.2 Análisis de los gases de combustión

Un analizador de gases de escape combinado con los registro de O₂ y CO en el cuarto de control, es un instrumento que no debe faltar en un horno. El analizador fijo en la entrada del horno es un instrumento que necesariamente debe estar en operación todo el tiempo que el horno este operando.

Debido a que el analizador muestrea gases con polvo del horno y toma la muestra en una localización donde prevalecen altas temperaturas, tiene tendencia a dañarse frecuentemente a menos que un mantenimiento diario preventivo se lleve a cabo en esta unidad. La localización, donde la sonda de la muestra es instalada, es también un punto clave a considerar como la infiltración de aire podría distorsionar los verdaderos contenidos de O₂ y CO₂ en los gases de escape.

La operación del horno sin que el analizador funcione correctamente, es muy peligrosa y puede llevar a accidentes catastróficos. Si se indica la presencia de CO, se debe reducir la tasa de combustible inmediatamente.

⁷ The Rotary Cement Kiln
KURT E. PERAY, Segunda Edición, USA, 1986

Un contenido muy alto (más que 3,5%) y muy poco (menos que 0,7%) en los gases de escape representa una operación ineficiente y 1,0 – 1,5 % de oxígeno es un nivel que resulta en óptimas condiciones de operación.

Esto se aplica a todos los hornos con excepción de un horno con precalcinador que no tiene suministro de aire terciario al calcinador.

Cuando el horno opera establemente pero continuamente con contenidos de oxígeno más altos o más bajos; para que prevalezcan las condiciones estables, no se deben hacer cambios drásticos tales que podrían distorsionar el delicado balance del horno. Es aconsejable afinar los controles en pequeñas etapas, permitiendo un amplio tiempo de cerca de una hora entre cada etapa para asegurar que el balance y la estabilidad no sea disturbada. El afinamiento de esta manera puede tomar de 8 a 16 horas y está referido a optimizar la operación del horno. Se debe seguir las siguientes etapas básicas en materia de control de los gases de escape.

- ◆ Asegurar la seguridad del equipo y del personal (debe observarse suficiente O₂ disponible y no haber CO).
- ◆ Estabilizar al horno (Nivel de O₂ correcto, debe permanecer dentro de un rango angosto).
- ◆ Optimizar el O₂ en pequeñas etapas para que el contenido de oxígeno este dentro del rango de 1,00 – 1,5 % para una eficiencia óptima del horno.

La mayoría de los hornos son equipados con analizadores que prueban solamente los contenidos de oxígeno y de monóxido de carbono que son consideradas las dos claves en el control de la combustión.

En años recientes, un gran logro de trabajo ha sido hecho en algunas plantas en la utilización del registro de NO_x en los gases de escape del horno, para determinar los cambios en la temperatura de la zona de quema. Originalmente estos analizadores de NO_x fueron instalados y usados para el propósito de control de emisión para satisfacer especificaciones de seguridad ambiental. Se reconoce la relación entre el NO_x en los gases de escape y la temperatura en

la zona de quema. Diferentes concentraciones de NOx en los gases de escape cuando la temperatura de combustión en la zona de quema cambia. Temperaturas más altas de la llama resultan en NOx más alto. Cuando el exceso de aire (O₂) se incrementa, el NOx también se incrementa.

Los componentes de los gases de escape son afectados como sigue, asumiendo que las otras variables permanecen constantes.

Los registros de oxígeno usualmente muestran largas variaciones en rango aun con el horno en operación estable. Esto es referido también como un proceso “ruidoso” y ocurre normalmente en muchos hornos. Sin embargo, cuando este así llamado “ruidoso” excede un rango de +0,5 % en intervalos de tiempo cortos, esto podría ser una indicación de tasas de flujo de combustible o de aire irregulares que tienen lugar dentro del sistema y deberían ser investigados.

Puesto que el proceso “ruidoso” es común al analizador de oxígeno, el instrumento debería ser chequeado cuando las cartas de registro de oxígeno trazan una línea recta por un largo período de tiempo.

Tabla N° 2 Incremento y Disminución de Gases

		O ₂	CO	NO _x	CO ₂
Combustible	Incremento Disminución	Abajo Arriba	arriba abajo	abajo arriba	Abajo Arriba
Ventilador de tiro	Incremento Disminución	Arriba Abajo	abajo arriba	arriba abajo	Arriba Abajo
Temperatura de la llama	Incremento Disminución	Igual Igual	igual igual	arriba abajo	Igual Igual
Tasa de alimentación	Incremento Disminución	Abajo Arriba	igual igual	igual igual	Arriba Abajo

Fuente: The Rotary Cement Kiln KURT E. PERAY, Segunda Edición, USA, 1986

La mayoría de los registros de oxígeno, registran esta variable dentro del rango de 0 – 5 %. Es importante recordar que cuando el registro está pegado a la máxima por un periodo de tiempo largo, no se puede conocer si el oxígeno está

en 5,1 % o 15 %. Al poco tiempo, bajo estas circunstancias, no se podría conocer en qué condiciones esta la combustión.

Es una buena práctica de quemado, siempre fijar la tasa de combustible y/o la velocidad del ventilador de tiro de tal forma que el registro de oxígeno este siempre bajo la marca del 5% cuando el combustible este siendo quemado dentro del horno; esto es muy importante durante las veces que le horno se arranca y se calienta. Tan pronto como el quemador principal es encendido en el horno, la prioridad entonces es estabilizar el contenido de oxígeno en un nivel que este por lo menos bajo la marca del 5 %.

1.1.3.6.3 Control de la tasa de combustible

Antes de que se encienda el fuego principal en el horno, se debe asegurar que se reúnan los siguientes requerimientos:

- ◆ Que esté presente la suficiente cantidad de aire para alcanzar la combustión completa.
- ◆ El analizador de gases debe estar operando y funcionando adecuadamente.
- ◆ Que esté presente suficiente calor para encender el combustible.
- ◆ Que el ventilador de tiro este encendido y que el tiro del horno sea regulado adecuadamente para evitar un encendido abrupto, demorado y explosivo de la llama.
- ◆ El piso del quemador debe estar libre de personal no autorizado.
- ◆ El ventilador de aire primario debe estar encendido y fijada su tasa de flujo adecuadamente.

Una vez que el combustible ha sido encendido y una llama adecuada ha sido obtenida, se debe chequear inmediatamente el registro del analizador de gases, para asegurarse que no se vea combustibles CO después de un tiempo de 30 segundos. Después de esto, los ajustes necesarios (combustibles o velocidad del ventilador de tiro) tienen que hacerse para traer al contenido de oxígeno bajo la marca del 5 %.

Cuando se desea hacer un cambio en la velocidad del ventilador de tiro, la tasa de combustible, o las dos, se tiene que anticipar a la posible reacción causada por el cambio, recordando que un incremento en la tasa de combustible resulta en una temperatura más alta de la entrada del horno, bajo porcentaje de oxígeno en los gases de escape y alta temperatura en la zona de quema, y que un incremento en la velocidad del ventilador de tiro resultará en un incremento en la temperatura de la cámara de entrada del horno, mas oxígeno en los gases de salida, y una temperatura más baja en la zona de quema.

De esto llega a ser obvio que la tasa de combustible sola, no regula la temperatura de la zona de quema.

Sin cambio en la tasa de combustible, un cambio en la temperatura de la zona de quema puede ser causada únicamente por la alteración en el tiro del horno con la velocidad del ventilador de tiro. El ajuste en la tasa de combustible dará una reacción más rápida cuando se requiere un cambio en la temperatura de la zona de quema.

1.1.4 COMBUSTIÓN

Es la conversión de energía química primaria contenida en combustibles tales como carbón, petróleo o madera en calor (energía secundaria) a través de un proceso de oxidación. Por tanto la combustión es el término técnico para la reacción química del oxígeno con los componentes combustibles de los combustibles incluyendo la emisión de energía.

Los procesos de combustión se realizan a temperaturas elevadas (hasta 1000°C o superior). El oxígeno necesario para la combustión se suministra como parte del aire de combustión suministrado para el proceso. Junto al volumen considerado de gases de salida (gases de combustión), dependiendo del tipo de combustible, se produce una cierta cantidad de residuos (ceniza, escombros).

La operación exitosa de un horno rotativo durante el proceso de clinkerización, requiere una fuente adecuada de calor, que primero elevará a la temperatura

deseada de operación y mantendrá esta temperatura por la compensación de varias pérdidas que ocurren en el sistema del horno, incluyendo el calor requerido para el proceso.

El calor requerido es obtenido por combustión del combustible, una reacción química en la cual el C, H₂ y S se combinan con el oxígeno del aire. Para que la combustión tenga lugar, se deben cumplir dos requerimientos:

- ◆ Suficiente oxígeno debe estar presente en la mezcla con el combustible.
- ◆ Una cierta temperatura debe ser mantenida para encender la mezcla de combustible – oxígeno.

La relación triangular que lleva a la combustión es:

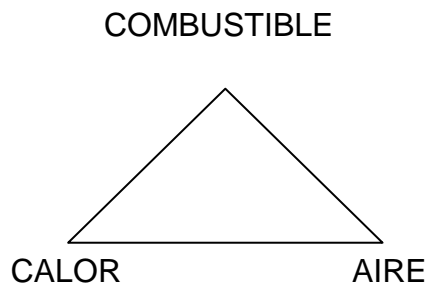


Fig. N° 2 Reacción triangular de la Combustión

Si se pierde cualquiera de estos tres eslabones, no tendrá lugar la combustión. Si no hay suficiente aire en el horno, no habrá fuego adecuado. Además, las condiciones de quema dentro del horno, deben ser tales que las partículas de combustible se combustionen completamente mientras que el combustible este todavía en suspensión en la atmósfera.

1.1.4.1 FASES DE LA REACCIÓN DE COMBUSTIÓN

Se pueden distinguir tres fases en la reacción de combustión:

- ◆ **Fase de pre - reacción (formación de radicales):** Los compuestos hidrocarbonados se descomponen dando lugar a la formación de *radicales*, que son unos compuestos intermedios inestables y muy

activos, para que de este modo el carbono y el hidrógeno puedan reaccionar con el oxígeno.

- ◆ **Fase de Oxidación:** En esta fase se produce la combinación entre los elementos y el oxígeno. Es una fase exotérmica, y es aquí cuando tiene lugar la propagación de la llama.
- ◆ **Fase de Terminación:** Se forman los compuestos estables. El conjunto de estos compuestos es lo que llamamos *gases de combustión*.

Es necesario que se produzca una gran coordinación entre la 1ª y la 2ª fase, ya que si no podría llegar a producirse una explosión, por acumulación de radicales.⁸

1.1.4.2 TIPOS DE COMBUSTIÓN

1.1.4.2.1 Combustión neutra

Es aquella que se produce cuando el aire empleado aporta la cantidad justa de oxígeno para que todos los reactivos se transformen en productos. Para que la estequiometría se cumpla, hay que considerar todos los elementos que sufren la reacción de combustión en el combustible. Cuando la reacción tenga lugar totalmente, entonces no habrá H₂, O₂, S y C, que se transformarán en productos correspondientes que irán en los *gases de combustión*. Como inertes aparecerá por lo menos el nitrógeno.

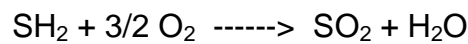
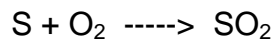
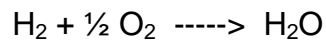
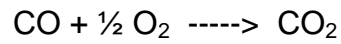
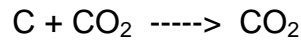
A veces, a los gases de combustión se les llama poder comburívoro o poder fumígeno. Se define éste como los gases húmedos totales procedentes de una *combustión neutra o estequiométrica* (de todos los elementos combustibles e inertes también).

1.1.4.2.2 Combustión completa

En la combustión completa se queman las sustancias combustibles del combustible hasta el máximo grado posible de oxidación. En este tipo de reacción no se encontraran sustancias combustibles en los humos o gases de

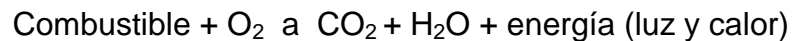
⁸Combustión
<http://es.wikipedia.org/wiki/Combusti%C3%B3n>

combustión. Las reacciones químicas que se utilizan en el estudio de las combustiones técnicas tanto si se emplea aire u oxígeno, son muy sencillas y las principales son:



Estas reacciones pertenecen a reacciones completas de sustancias que pueden pertenecer a un combustible gaseoso, líquido o sólido y se expresan para 1 mol o 1 Kmol de sustancia combustible.

En una combustión completa si el combustible es un hidrocarburo, el carbono pasara a dióxido de carbono y el hidrogeno a agua.



El calor de la reacción se libera, por eso se dice que es una reacción exotérmica. Esa energía calórica hace evaporar el agua, o sea los productos de una combustión completa están en estado gaseoso.

La combustión completa presenta llama azul pálido, y es la que libera mayor cantidad de calor –comparada con la combustión incompleta del mismo combustible. Entonces, para hacer rendir mejor el combustible, hay que airear el lugar donde ocurre una combustión.

1.1.4.2.3 Combustión incompleta

La combustión es incompleta cuando la cantidad de O_2 no es suficiente para quemar de modo completo al combustible. Los productos de la combustión

incompleta varían según la cantidad de oxígeno disponible. Generalmente se forma monóxido de carbono (CO), gas sumamente tóxico.

Otro producto de una combustión incompleta es el carbón sólido, que por acción del calor se pone incandescente y da ese color amarillo-anaranjado a la llama, que por eso se le dice llama luminosa o fuliginosa. Este carbón, finamente dividido, se eleva por el calor que desprende la combustión, y se va enfriando a medida que se aleja de la fuente de calor, formando humo negro, que se deposita en los objetos cercanos formando lo que se conoce como hollín.

También se produce agua, en estado de vapor, como otro producto de la combustión incompleta.

La combustión incompleta no solo es peligrosa, sino que libera menor cantidad de calor que la combustión completa del mismo combustible, o sea que lo malgasta. Generalmente, estas combustiones se producen cuando el combustible tiene un alto porcentaje del elemento carbono.

La combustión incompleta es fácilmente reconocida cuando cualquier porcentaje, sin importar cuán pequeño, es indicado en el indicador de **CO**, nunca debe permitirse que un horno rotativo opere bajo condiciones de combustión incompleta, lo que significa que en ningún momento debería estar presente el CO en los gases de escape.

A través del tiempo y la experiencia, se ha encontrado que un horno rotativo opera mejor, cuando los gases de escape del horno tienen un contenido de oxígeno no menor que 0,7% y no mayor que 3,5% bajo condiciones estables. El punto óptimo está entre 1 y 1,5% de oxígeno. ⁹

1.1.4.3 PRODUCTOS DE LA COMBUSTIÓN

Los principales productos de la combustión de combustibles de origen hidrocarburífero son:

⁹ Tipos de Combustión
CENGEL YUNUS A., Tomo II, 2a Ed., Mc. Graw Hill

- ◆ CO₂, H₂O, N₂, O₂
- ◆ CO, SO_x, NO_x
- ◆ Hollín, Hidrocarburos mal quemados
- ◆ Metales fundidos/solidificados

Los gases de escape generados en los procesos de combustión se denominan gases de combustión o gases de chimenea. Su composición depende del tipo de combustible y de las condiciones de combustión, ej. el valor de la proporción de aire. Muchos de los componentes de los gases de combustión son aires contaminantes y por tanto, debido a las regulaciones gubernamentales deben eliminarse o reducirse al mínimo con procedimientos especiales de limpieza antes de liberar el gas a la atmósfera. El gas de escape en su estado original se conoce como gas crudo, después de una limpieza se conoce como gas limpio.

A continuación se tratan los principales componentes de los gases de combustión.

- ◆ **Nitrógeno (N₂)**

El nitrógeno es el principal componente (79 Vol. %) del aire. Este gas incoloro, inodoro y sin sabor alimenta a la combustión como parte del aire de combustión pero no interviene directamente en el proceso de combustión. Actúa como un material de lastre y como transporte del calor de los residuos y se libera otra vez a la atmósfera. No obstante, cantidades pequeñas de este aire de combustión relacionado con el nitrógeno son, junto con el nitrógeno liberado del combustible, responsables de la formación de óxidos nitrógenos peligrosos.

- ◆ **Dióxido de carbono (CO₂)**

El dióxido de carbono es un gas incoloro, inodoro con un ligero sabor agrio. Se produce en todos los procesos de combustión incluyendo la respiración.

Contribuye considerablemente al efecto invernadero gracias a su capacidad de filtrar la radiación de calor. En el ambiente la concentración de CO₂ es 0,03%; a concentraciones superiores a 15% se produce una pérdida inmediata de conciencia.

◆ **Vapor de agua (humedad)**

El hidrógeno contenido en el combustible reaccionará con el oxígeno y formará agua (H₂O). Esta, junto con el contenido de agua del combustible y el aire de combustión, se convierte tanto en humedad de los gases de combustión (a elevadas temperaturas) como en condensados (a bajas temperaturas).

◆ **Oxígeno (O₂)**

La parte de oxígeno que no se ha consumido en el proceso de combustión permanece como parte de los gases de combustión y es una medida para el rendimiento de la combustión. Se utiliza para determinar los parámetros de combustión y también actúa como valor de referencia.

◆ **Monóxido de carbono (CO)**

El monóxido de carbono es un gas incoloro, inodoro y tóxico. En la mayoría de ocasiones se forma durante una combustión incompleta de hidrocarburos y otros materiales que contienen carbón. Al aire libre el CO no es muy peligroso para las personas ya que reacciona rápidamente y pasa a CO₂ con el oxígeno. No obstante, en espacios cerrados o interiores debe considerarse como muy peligroso, ya que en concentraciones de tan sólo 700 ppm en el aire que respiramos puede conducir a la muerte en pocas horas. El valor límite en lugares de trabajo es de 50 ppm.

◆ **Óxidos de nitrógeno (NO y NO₂, suman NO_x)**

A altas temperaturas en procesos de combustión el nitrógeno del combustible y también del aire de combustión reacciona con el oxígeno

del aire de combustión y forma primero monóxido de nitrógeno (combustible-NO y NO-térmico). Este NO reaccionará con el oxígeno acumulado y/o más tarde en la atmósfera y forma el peligroso dióxido de nitrógeno (NO₂). ¡Los dos óxidos son tóxicos! Especialmente el NO₂ es muy peligroso para el pulmón y contribuye, junto con la luz solar, a la formación de ozono. Además, se han desarrollado medidas especiales (suministro de aire por estadios) para reducir la formación de óxidos nitrógenos durante el proceso de combustión.

◆ **Dióxido de azufre (SO₂)**

El dióxido de azufre es un gas tóxico, incoloro y con un olor muy fuerte. Se forma a partir de la oxidación del azufre que está presente en el combustible.

El valor límite en el lugar de trabajo es de 5 ppm. Junto con agua o condensados forma el ácido sulfuroso (H₂SO₃) y el ácido sulfúrico (H₂SO₄), ambos son muy dañinos por ej. en la naturaleza y en edificios (lluvia ácida). Se utilizan filtros/depuradoras para limpiar los gases de combustión de óxidos de azufre.

◆ **Sulfuro de hidrógeno (H₂S)**

El sulfuro de hidrógeno es un gas tóxico, incluso en concentraciones muy bajas (aproximadamente 2,5 g/m³) tiene un olor muy fuerte y característico. Es un componente del crudo de petróleo y del gas natural y por tanto está presente en refinerías y plantas de Gas natural pero también se genera durante otros procesos industriales y, como producto de una combustión incompleta, en el catalizador de vehículos de motor. El H₂S se elimina de los gases de escape por conversión a SO₂ a través de procesos de absorción o, en grandes cantidades, con una reacción de sulfuro elemental (proceso Claus).

◆ **Hidrocarburos (C_xH_y o HC)**

Los hidrocarburos son un amplio grupo de compuestos químicos compuestos a partir de enlaces de hidrógeno y carbono. Los CH son la

base de la química orgánica; en la naturaleza se encuentran en el crudo de petróleo, gas natural y carbón. Las emisiones tienen lugar durante la producción de productos hidrocarbonados (ej. en refinerías) así como durante su uso y quemado. Otros ejemplos son disolventes, plásticos, barnices, combustibles de vehículos etc. Las fuentes de emisión de CH también se forman debido a un proceso de combustión incompleta ej. Incendios forestales y cigarrillos. Las emisiones de hidrocarburos también contribuyen al efecto invernadero.

Los hidrocarburos incluyen miles de componentes, metano (CH_4), butano (C_4H_{10}), benceno (C_6H_6), y también componentes cancerígenos como el benzopireno. La cantidad total de hidrocarburos volátiles en un gas de combustión normalmente se describe como "hidrocarburo total". Normalmente en el control de emisiones se especifica y mide el valor del "hidrocarburo total".

◆ **Sólidos (polvo, hollín)**

Los contaminantes sólidos en los gases de combustión se originan a partir de componentes incombustibles de los combustibles sólidos o líquidos. Estos incluyen óxidos de sílice, aluminio, calcio en el caso de carbón, o sulfatos de diferentes elementos en el caso de fuel pesado. El polvo es peligroso para los seres vivos ya que las partículas de polvo pueden estar recubiertas por sustancias tóxicas y/o cancerígenas.

◆ **Metales pesados**

Las materias primas y los combustibles contienen en función de su origen, siempre, metales en concentraciones variables. El proceso de derivados de cal tiene una gran capacidad para fijar los metales que entran con los materiales o los combustibles. Los metales son embebidos en la estructura cristalina del producto, no afectando a su calidad.

El principal foco emisor de metales es el sistema de horno, incluyendo los gases de combustión y el aire de los enfriadores. Las partículas

emitidas en estos flujos contienen muy pequeñas cantidades de compuestos metálicos tales como zinc (Zn), cadmio (Cd), mercurio (Hg), plomo (Pb), talio (Tl) y arsénico (As). La concentración de las emisiones de metales varía ampliamente en función de las materias primas, los combustibles y de los ciclos en el sistema de horno.

En el polvo recogido en el filtro (de mangas o electro filtro) son retenidos todos los metales: metales de baja (Cr, Cu, Ni, Ti, Ag, etc.) y media volatilidad (Cd, Pb, Se, Zn, Sb, Se, Na y K), a excepción de los metales volátiles, como el Hg, Tl cuya presencia, se limita estrictamente.

El talio condensa aproximadamente entre 300-350°C, el mercurio entre 120-150°C. Mientras que el talio se precipita casi totalmente sobre las partículas de polvo que abandonan el horno, sólo parte del mercurio es recogido por los sistemas de filtros. Por ello, el Hg es el único metal que puede ser emitido con la corriente de gases limpios que abandonan la chimenea.

Por tanto, el control de las emisiones mediante el uso de eficientes equipos de separación de partículas, es una medida directa en el control de las emisiones de metales al medioambiente. ¹⁰

1.1.4.4 PROCESOS DE COMBUSTIÓN TEÓRICO Y REAL

1.1.2.4.1 Proceso de Combustión Teórico

El proceso de combustión ideal durante el cual un combustible se quema por completo con aire teórico se conoce como **combustión estequiométrica o teórica** de ese combustible.

Aire teórico

Denominado aire estequiométrico, se define como la cantidad mínima necesaria para la combustión completa de un combustible. De manera que cuando un combustible se quema por completo con aire teórico, no estará presente oxígeno no combinado en el producto de los gases. El aire teórico también se conoce como cantidad de aire químicamente correcta, o aire 100%

¹⁰ Gases de Combustión
<http://www.academiatesto.com.ar/cms/?q=gases-de-combustion-1>

teórico. Entonces un proceso de combustión con menos cantidad de aire teórico está condenado a ser incompleto.

1.1.2.4.2 Proceso de Combustión Real

En los procesos de combustión reales es una práctica común emplear más aire que la cantidad estequiométrica, con el fin de aumentar las oportunidades de combustión completa o para controlar la temperatura de la cámara de combustión.

Exceso de Aire

Es la cantidad de aire en exceso de la cantidad estequiométrica. Suele expresarse en términos del aire estequiométrico como aire de exceso porcentual o aire teórico porcentual. Así por ejemplo 50% de exceso de aire es equivalente a 150% de aire teórico.

La cantidad de aire utilizada en los procesos de combustión se expresa también en términos de la razón de equivalencia, la cual es la proporción entre la relación combustible-aire real o la relación combustible-aire estequiométrico.

1.1.2.4.3 Relación aire combustible

Se representa como AC y es una cantidad utilizada en el análisis de procesos de combustión para cuantificar las cantidades de aire y combustible. Suele expresarse en una base de masa y se define como la proporción entre la masa del aire y la masa del combustible en un proceso de combustión. Es decir;

Ec. N° 2

$$AC = \frac{m_{aire}}{m_{combustible}}$$

La masa m de una sustancia se relaciona con el número de moles N por medio de la relación $m=NM$, donde M es la masa molar.

La relación aire-combustible puede expresarse también en una base molar como la proporción entre el número de moles del aire y el número de moles del combustible. El recíproco de la relación aire-combustible se conoce como relación combustible-aire.

La predicción de la composición de los productos es relativamente fácil cuando se supone que el proceso de combustión será completo y que se conocen las cantidades exactas de combustible y aire utilizados.

Todo lo que se necesita en este caso es aplicar el principio de la conservación de la masa a cada elemento que aparece en la ecuación de la combustión, sin necesidad de tomar otras medidas. Sin embargo cuando uno trata, con procesos de combustión reales, las cosas no son tan sencillas, Por alguna razón, es difícil que los procesos de combustión reales, siempre sean completos, incluso en la presencia de un exceso de aire.

Por tanto, es imposible predecir la composición de los productos con base solo en el principio de la conservación de la masa. Por ello la única opción es medir directamente la cantidad de cada componente en los productos. ¹¹

1.1.4.5 ANÁLISIS DE GAS PARA LA OPTIMIZACIÓN DE LA COMBUSTIÓN

Los principales componentes para la optimización de la combustión son:

- ◆ Composición del combustible y el aire de combustión.
- ◆ Procedimiento de encendido y la temperatura de combustión.
- ◆ Características del quemador y diseño de la cámara de combustión.
- ◆ Relación combustible/aire.

Para una planta y un combustible determinado la relación óptima combustible/aire de combustión (valor exceso de aire) puede determinarse a partir de los resultados de análisis de gases con el diagrama de combustión. En este diagrama la concentración de los componentes de los gases CO, CO₂ y O₂ se visualizan en función del valor de exceso de aire.

¹¹ **Combustión Teórica y Real**
CENGEL YUNUS A., Tomo II, 2a Ed., Mc. Graw Hill.

La línea que representa la combustión ideal sin exceso de aire (ex. aire=1) se encuentra en el centro del diagrama; en el lado derecho aumenta el valor de exceso de aire; en el lado izquierdo existe un defecto de aire (ex. aire<1). El defecto de aire también significa un defecto de oxígeno.

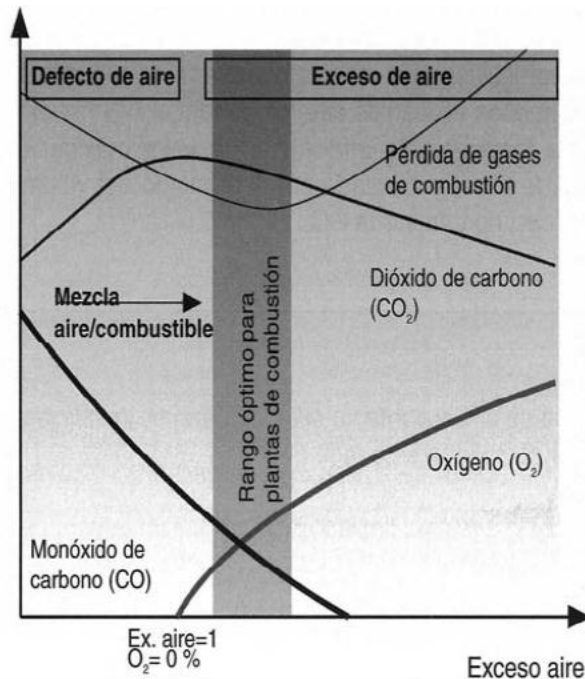


Fig. N° 3 Diagrama de Combustión

1.1.4.6 TIPOS DE COMBUSTIBLE

Están disponibles en diferentes formas y composiciones:

1.1.4.6.1 Los combustibles sólidos

Se puede mencionar: (carbón duro, carbón bituminoso, turba, madera, paja) contienen carbono (C), hidrógeno (H₂), oxígeno (O₂), y pequeñas cantidades de azufre (S), nitrógeno (N₂), y agua (H₂O). El mayor problema cuando se manejan estos combustibles es la formación de grandes cantidades de ceniza, partículas y hollín.

1.1.4.6.2 Los combustibles líquidos

Principalmente derivan del petróleo y pueden clasificarse en combustibles ligeros, medianos y pesados. El gasoil (es decir, combustible diesel) es ampliamente utilizado en plantas de combustión pequeñas.

1.1.4.6.3 Los combustibles gaseosos

Son una mezcla de gases combustibles (CO , H_2 e hidrocarburos) y gases no combustibles. En la actualidad se utiliza muy a menudo el gas natural, que contiene metano (CH_4) como componente principal.

Es importante conocer la composición del combustible para un proceso de combustión óptimo y económico. Aumentar el porcentaje de componentes de combustible no combustibles (inactivos) reduce tanto el valor calorífico neto como bruto y aumenta la contaminación de las paredes del horno.

Incrementar el contenido de agua es aumentar el punto de rocío y consumir parte de la energía generada para evaporar el agua de los gases de combustión. El azufre contenido en el combustible se quema/oxida a SO_2 , y SO_3 , el cual, a temperaturas inferiores al punto de rocío, puede provocar la formación de ácidos sulfúricos y sulfurosos agresivos. ¹²

1.1.5 CLINKERIZACIÓN

El proceso que se produce en el horno cementero es relativamente simple y consiste en calentar una mezcla preparada a partir de materias primas que permiten disponer de 4 óxidos: CaO , SiO_2 , Al_2O_3 y Fe_2O_3 .

La clinkerización consiste en combinar estos óxidos para formar componentes mineralógicos que proporcionan resistencia mecánica y durabilidad química; en realidad los compuestos fundamentales son los silicatos dicálcicos (C_2S - belita) y tricálcico (C_3S - Alita); los compuestos que forman la alúmina y hierro también confieren algunas propiedades al clinker, pero su función principal en el proceso es formar la fase líquida que permite la formación de los silicatos cálcicos a temperaturas reducidas (1300-1350 °C).

El clinker que produce el horno, molido con yeso como retardador de fraguado, es el cemento que constituye el conglomerante hidráulico por excelencia, al desarrollar su resistencia por hidratación de los silicatos cálcicos.

¹² **Combustión**
Análisis de gases de combustión, 2da edición.

1.1.6 CLÍNKER

A principios del siglo XIX, las investigaciones del ingeniero francés J.L. Vicat y el constructor inglés J. Aspdin, conducen al descubrimiento de un cemento mejorado al que se llamó "CEMENTO PORTLAND" porque se asemejaba a una piedra gris muy oscura que se encuentra en la isla de Portland, Inglaterra.

La elaboración de este cemento consistía en hornear una mezcla de arcilla finamente triturada y caliza dura hasta eliminar el CO_2 ; la temperatura de horneado era mucho más baja que la necesaria para la formación del clínker, material principal con el que actualmente se elabora el cemento.

El prototipo del cemento moderno fue obtenido en 1845 por Isaac Johnson, quien quemó una mezcla de caliza y arcilla hasta lograr la formación de clínker, con lo cual se produjo la reacción necesaria para la formación de un compuesto fuertemente cementoso.

Al clínker se lo puede definir como: producto gris-verdoso, constituido en su mayor parte por silicato de calcio obtenido por cocción hasta fusión parcial (clinkerización) de una mezcla definida y homogénea de materiales que contienen principalmente CaO , SiO_2 , Al_2O_3 y Fe_2O_3 .¹³

1.1.7 ANALIZADORES DE GASES

El corazón de cualquier analizador es un sistema de sensores o un sensor específico. Su funcionalidad se basa en un principio físico o fisicoquímico definido como la absorción, adsorción, transmisión, ionización, conductividad, magnetismo, etc.

Los sensores reaccionan a las variaciones de la propiedad en cuestión de la muestra con la variación correspondiente de su propiedad (mayor absorción de

¹³ Clinkerización
materialesabel.webhispana.net/cemento/pagcemento/cemclin.htm

luz o menor conductividad eléctrica, por ejemplo) y con ello se obtiene una señal de medición.

1.1.7.1 TIPOS DE ANALIZADORES DE GASES

- ◆ *Analizadores portátiles* para aplicación móvil de un analizador en diferentes puntos de medición para mediciones de corta duración.
- ◆ *Analizadores para instalaciones fijas* en puntos definidos de una planta, para mediciones continuas durante meses y años.
- ◆ *Analizadores in-situ*, que se instalan y operan directamente en la corriente del proceso.
- ◆ *Analizadores extractivos*, que se instalan en un *rack* o una caja de analizador (recipiente) fuera de la corriente del proceso y utilizan una sonda de muestreo y una unidad de condicionamiento de gas muestra para suministro de gas muestra.

1.1.7.2 ANALIZADOR DE GASES PORTÁTIL TESTO 350

Los analizadores de gases Testo se utilizan ampliamente en la industria para el análisis de gases de combustión en el área de control de emisiones siendo esto sólo uno de sus campos de aplicación.

El **testo 350** es un analizador portátil de gas de extracción que, a cause de sus características específicas (refrigerador de muestras de gas, calibración automática, sonda de limpieza automática de muestras), también están calificados para instalaciones fijas y para realizar mediciones continuas durante varias semanas.

Con ello, abren nuevos campos de aplicación y ofrecen al usuario soluciones universales y muy rentables de instrumentación. Los sensores electroquímicos se utilizan con preferencia por sus pequeñas dimensiones y su bajo consumo de energía. Son muy adecuados para los analizadores portátiles.

No obstante, el principio de medición de estos sensores requiere un gran conocimiento y experiencia del fabricante durante el desarrollo y la producción para cumplir las estrictas especificaciones de las aplicaciones del proceso.

Para determinar gases como CO, SO₂ o NO_x, se utilizan sensores de tres electrodos. El sensor de CO:

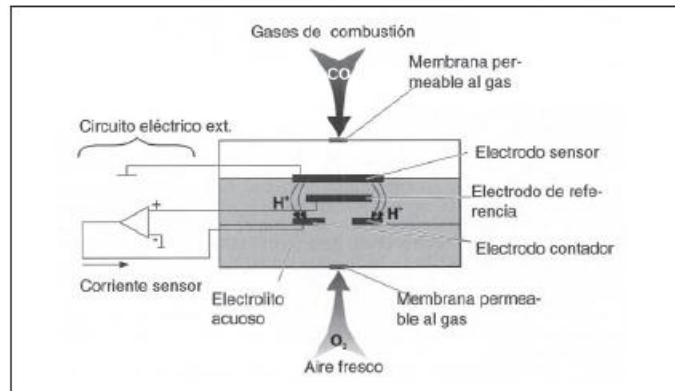


Fig. N° 4 Esquema de un sensor de monóxido de carbono

Las moléculas de monóxido de carbono (CO) atraviesan la membrana permeable al gas y se dirigen al electrodo sensor del sensor. En él se produce una reacción química que origina la formación de iones H⁺ que migran del electrodo sensor al electrodo contador.

En el electrodo contador, se produce una segunda reacción química con la ayuda del oxígeno del aire fresco. Esta segunda reacción provoca una corriente que circula en el circuito externo. La corriente puede evaluarse como medida de la concentración de monóxido de carbono. El electrodo de referencia sirve para estabilizar la señal del sensor.

La vida útil de este tipo de sensor es de aproximadamente 2 años.

1.1.7.2.1 Aplicaciones del testo 350

Las siguientes aplicaciones están muy especificadas:

- ◆ **Mediciones de ajuste y mantenimiento** en la modernización de plantas, para la localización de procesos inestables, para comprobaciones después de reparaciones o para adelantar la preparación de mediciones reguladas.

- ◆ **Mediciones de procesos para la optimización de la combustión** analizando combustible, aire de combustión y gases de combustión para de esta manera reducir el consumo de combustible, mejorar el rendimiento de la planta o ampliar el tiempo de vida de la planta.
- ◆ **Mediciones de procesos para controlar atmósferas de gas definido** en hornos especiales u hornos para procesos como cocción (ej. cemento), sinterización o tratamiento de superficies.
- ◆ **Mediciones de procesos y emisiones** para el control de funcionamiento de instalaciones de limpieza de gases de combustión.
- ◆ **Mediciones de emisiones** en chimeneas para controlar los valores de contaminantes y para asegurar su conformidad con las regulaciones oficiales. ¹⁴

1.1.7.3 ANALIZADOR DE GASES PARA INSTALACIONES FIJAS ITECA SOCADEI

El analizador de gas de ITECA SOCADEI está diseñado para extraer muestras de la combustión de los gases directamente provenientes de la cámara de humos, este incluye:

- ◆ Un gabinete de análisis dividido en dos secciones, 1. procesamiento de gas y 2. Análisis.
- ◆ Una sonda de toma de muestras de gas equipada con una funda para la protección térmica.
- ◆ Un sistema de enfriamiento.
- ◆ Un sistema de purga para la sonda.
- ◆ Una cámara de pre-separación de gas y sedimentos.

La sonda pulveriza agua bajo presión y recolecta una parte del agua con gas. La mezcla es transportada a una unidad de procesamiento donde se realizará una vasta separación del gas y el agua.

¹⁴ **Analizadores de Gases**
Análisis de gases de combustión, 2da edición.

La unidad de procesamiento filtra y separa el gas del agua y lo envía a los analizadores de gas.

Una cámara de purga asegura una limpieza periódica del ducto de toma de muestras, mientras el dispositivo de enfriamiento mantiene los parámetros del sistema vital bajo control.

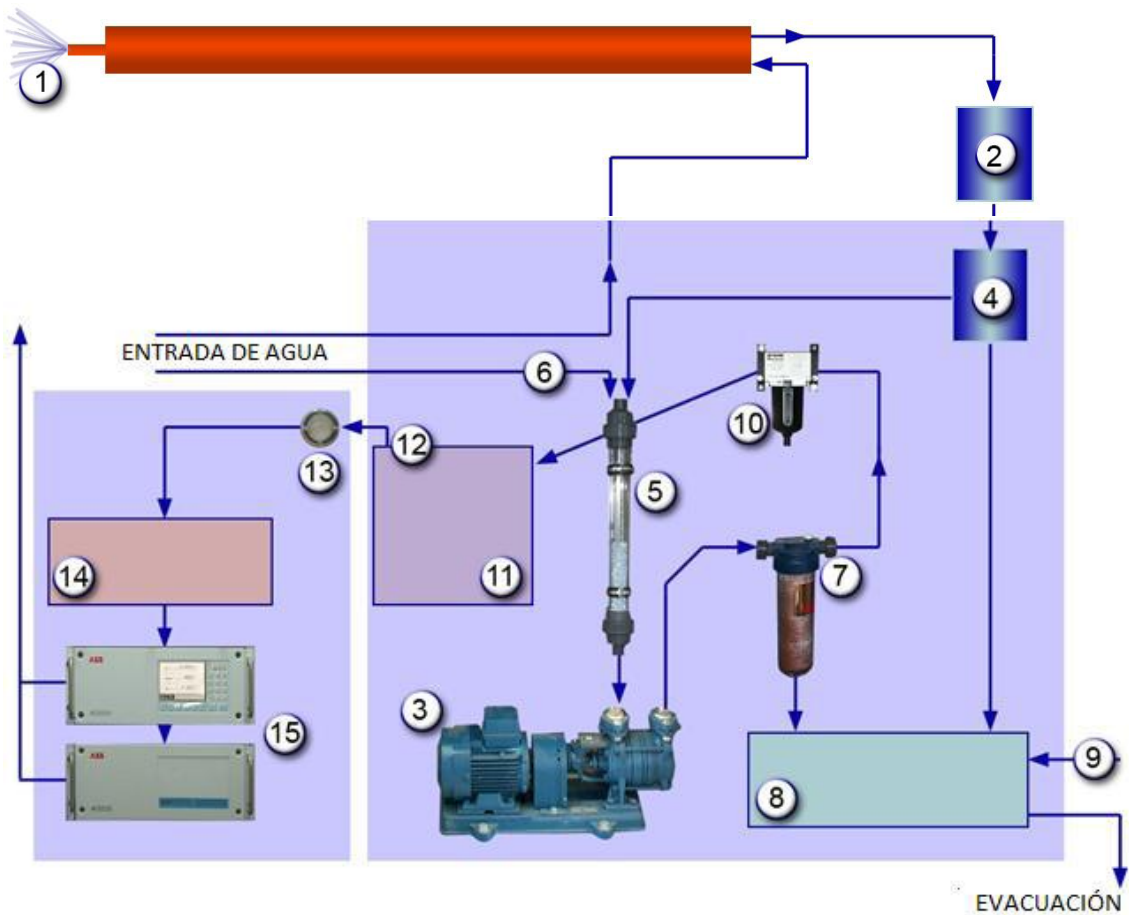


Fig. N° 5 Esquema Analizador de Gases ITECA SOCADEI

La muestra del gas es tomada por medio de aspiración al extremo de la sonda.

1. Una pulverización controlada de agua en el punto de toma permite que la cantidad de toma sea de mayor tamaño. Luego esta muestra fluye hacia el retorno de muestras de la línea de medición.

El agua y el gas son bastamente separados dentro de un tanque de pre-separación a la salida de la sonda. 2. Cuando la mezcla de gas y sedimento que componen a la muestra tomada, entra al gabinete de análisis, esta es

extraída utilizando una bomba hidro-rotativa. **3.** Esto permite un rango de fluidez. La mezcla llevará a cabo una serie de procesos de limpieza y filtración. Un tanque separador **4.** Remueve los sedimentos y los lleva a la bandeja de sedimentos. **8.** El gas recolectado y agua restantes son enviados a través de un filtro circular de vidrio. **5.** Este retiene cualquier elemento sólido residual antes de que el gas y el agua pasen a través de la bomba.

El suministro de agua a la bomba es proveído por un circuito llamado “circuito de reciclaje”.

6. En la salida de la bomba, el “separador de agua y gas” (esfera de vidrio) **7.** Remueve el exceso de agua y gas en la sección baja de la bandeja de residuos **8,** inyección controlada de agua **9.** A través de un electro válvula es posible emulsificar los sedimentos cíclicamente para facilitar su remoción.

Luego, el gas es dirigido hacia el “secador de aire” **11.** A través de un filtro de ciclón **10,** el cual remueve el agua en forma de neblina. El secador de aire de refrigeración **11** mantiene el punto de rocío a 3 °C para que de esta manera el gas solo contenga 6 gramos de agua por metro cúbico bajo las condiciones de vapor.

Cuando el gas deja el secador, un detector de humedad **12** se asegura que no haya agua en la muestra. Si hay algún rastro de agua, a los analizadores **15** no se les suministrará más gas. Este se elimina a través de la válvula de ventilación.

Un tipo de filtro de papel de fina filtración **13** asegura que el gas esté libre de partículas sólidas al entrar a la bandeja del electro válvula. **14.** Esta bandeja de la válvula **14** hace posible la desviación de la muestra hacia diferentes puntos del análisis y provee gases estándar para la calibración de los analizadores. ¹⁵

¹⁵ Principio de Operación
Manual del operador ITECA SOCADEI

CAPÍTULO II

PARTE EXPERIMENTAL

CAPITULO II

2 PARTE EXPERIMENTAL

Para desarrollar la parte experimental fue necesario estudiar todos y cada uno de los parámetros involucrados en la optimización del proceso de combustión en el área de clinkerización, además de la obtención de datos mediante una serie de monitoreos realizados durante dos meses consecutivos con el analizador estable ITECA SOCADEI ubicado en la entrada del horno, y la obtención de datos mediante el TESTO 350 con el fin de lograr una comparación de datos para lo cual se hizo un estudio previo de su funcionamiento.

Se presentan resultados determinados con anterioridad, los cuales han sido obtenidos en la torre de precalentamiento mediante el uso del analizador de gases TESTO 350; como aporte para el desarrollo de este proyecto de investigación.

2.1 MONITOREOS

Para realizar los monitoreos se debe tener en cuenta los siguientes aspectos:

- ◆ Los monitoreos se realizarán en la torre de precalentamiento Etapa 1 con el TESTO 350 y en la entrada del horno con el analizador estable ITECA SOCADEI.
- ◆ Se realizará una comparación de datos entre los obtenidos por el TESTO 350 y los obtenidos por el analizador estable ITECA SOCADEI.
- ◆ Los controles y monitoreos se iniciarán transcurrido un período mínimo de aproximadamente 3 horas a la puesta en marcha del horno, es decir cuando estabiliza su operación.
- ◆ La toma de muestras de los gases de la combustión y la medición de su temperatura se realizarán con el horno funcionando a la máxima potencia, asegurándose de que esté a régimen.

- ◆ La compuerta o las aberturas en la torre de precalentamiento, deberán estar cerradas para no modificar las condiciones normales de ventilación y del tiro del ventilador o conducto de humos.
- ◆ Si hubiera que practicar algún orificio en el conducto de evacuación, éste será circular y en ese caso, éste debe ser posteriormente obturado por medio de un tapón de plástico termo resistente.
- ◆ Se deben evitar las infiltraciones parásitas de aire por el orificio de la toma de muestras al introducir la sonda: el orificio estará posiblemente en depresión y la entrada de aire falso podría alterar los resultados de la analítica e incluso el valor de la temperatura de humos.
- ◆ La sonda debe dejarse en la posición de medida al menos 2 minutos, hasta que los valores a medir oscilen muy poco o sean razonablemente estables, en cuyo caso deben registrarse y anotarse. Si los valores están permanentemente oscilando (caso de aparatos en condiciones menos óptimas), deben observarse los valores alcanzados durante 1 minuto, registrando y anotando, si es preciso, el valor lo más cercano posible al máximo observado.
- ◆ En caso de que la alimentación en la entrada del horno este fallando, inmediatamente se tendrá q sacar la sonda estable para evitar posteriores daños. Una vez que la alimentación al horno se haya estabilizado se deberá ingresar la sonda, y de esta manera se conservará al equipo en óptimas condiciones para su funcionamiento.

2.1.1 SITUACIÓN ACTUAL DEL HORNO

Meses atrás se han venido realizando una serie de monitoreos in situ con el analizador de gases portátil, en la torre de precalentamiento, los resultados se presentan a continuación:

Tabla N° 3 Medición 11-09-2012

Fecha: 11-09-2012		variación combustible 2° medición: -	
Fuel: residuo		variación combustible 3° medición: -	
Empresa: Cemento Chimborazo C.A.			
T° ambiente: 21°C			
Parámetros	1° medición 10:20 am	2° medición 10:25 am	3° medición 10:30 am
Alimentación	50 ton/h	50 ton/h	50 ton/h
Combustible	3180 lt/h	3180 lt/h	3180 lt/h
Tiro	844 rpm	844 rpm	844 rpm
Velocidad horno	1,47 rpm	1,47 rpm	1,47 rpm
T° horno	1475 °C	1450 °C	1470 °C
Peso litro	1180 g/lt	1180 g/lt	1180 g/lt
O ₂	3,39%	3,45%	3,30%
CO	0,778 %	0,774 %	0,934 %
CO ₂	12,79%	12,74%	12,74%
NO _x	224 ppm	187 ppm	167 ppm
NO	213 ppm	178 ppm	159 ppm
SO ₂	77 ppm	90 ppm	82 ppm
Pump flow	0,95 lt/min	0,97 lt/min	0,96 lt/min

Fuente: Erika Cazorla

Tabla N° 4 Medición 13-09-2012

Fecha: 13-09-2012	
Fuel: residuo	
Empresa: Cemento Chimborazo C.A.	
T° ambiente: 20,7 °C	
Parámetros	1° medición 10:00 am
Alimentación	49 ton/h
Combustible	3140 lt/h
Tiro	840 rpm
Velocidad horno	1,43 rpm
T° horno	1487 °C
Peso litro	1190 g/lt
O ₂	3,81%
CO	0,732 %
CO ₂	12,50%
NO _x	235 ppm
NO	224 ppm
SO ₂	88 ppm
Pump flow	0,96 lt/min

Fuente: Erika Cazorla

Tabla N° 5 Medición 17-09-2012

Fecha: 17-09-2012		
Fuel: residuo		
Empresa: Cemento Chimborazo C.A.		
T° ambiente: 20 °C		
Parámetros	1° medición 10:00 am	2° medición 10:35 am
Alimentación	51 ton/h	51 ton/h
Combustible	3180 lt/h	3180 lt/h
Tiro	844 rpm	844 rpm
Velocidad horno	1,45 rpm	1,45 rpm
T° horno	1490 °C	1480 °C
Peso litro	1240 g/lt	1120 g/lt
O ₂	3,18%	3,94%
CO	1,042 %	1,622 %
CO ₂	12,76%	12,48%
NO _x	114 ppm	63 ppm
NO	105 ppm	57 ppm
SO ₂	491 ppm	765 ppm
Pump flow	0,95 lt/min	0,91 lt/min

Fuente: Erika Cazorla

Tabla N° 6 Medición 25-09-2012

Fecha: 25-09-2012	
Fuel: residuo	
Empresa: Cemento Chimborazo C.A.	
T° ambiente: 23 °C	
Parámetros	1° medición 11:45 am
Alimentación	48 ton/h
Combustible	3050 lt/h
Tiro	837 rpm
Velocidad horno	1,40 rpm
T° horno	1370 °C
Peso litro	1240 g/lt
O ₂	3,09%
CO	1,71 %
CO ₂	12,36%
NO _x	40 ppm
NO	33 ppm
SO ₂	813 ppm
Pump flow	0,95 lt/min

Fuente: Erika Cazorla

Tabla N° 7 Medición 26-09-2012

Fecha: 26-09-2012 variación combustible 2° medición: -		
Fuel: residuo		
Empresa: Cemento Chimborazo C.A.		
T° ambiente: 26 °C		
Parámetros	1° medición 10:00 am	2° medición 10:35 am
Alimentación	49 ton/h	49 ton/h
Combustible	3150 lt/h	3100 lt/h
Tiro	840 rpm	840 rpm
Velocidad horno	1,43 rpm	1,43 rpm
T° horno	1490 °C	1480 °C
Peso litro	1250 g/lt	1250 g/lt
O ₂	3,36%	3,52%
CO	1,336 %	1,923 %
CO ₂	12,42%	12,30%
NO _x	67 ppm	39 ppm
NO	62 ppm	33 ppm
SO ₂	754 ppm	992 ppm
Pump flow	0,92 lt/min	0,93 lt/min

Fuente: Erika Cazorla

Tabla N° 8 Medición 01-10-2012

Fecha: 01-10-2012 variación combustible 2° medición: 9 lt			
Fuel: residuo variación combustible 3° medición: 0 lt			
Empresa: Cemento Chimborazo C.A.			
T° ambiente: 23°C			
Parámetros	1° medición 10:45 am	2° medición 10:55 am	3° medición 11:15 am
Alimentación	36 ton/h	36 ton/h	36 ton/h
Combustible	2608 lt/h	2617 lt/h	2617 lt/h
Tiro	837 rpm	837 rpm	837 rpm
Velocidad horno	1,2 rpm	1,2 rpm	1,2 rpm
T° horno	1430 °C	1460 °C	1500 °C
Peso litro	1050 g/lt	1050 g/lt	1210 g/lt
O ₂	3,76%	4,39%	3,61%
CO	0,573 %	0,578 %	0,565 %
CO ₂	12,65%	12,17%	12,77%
NO _x	221 ppm	184 ppm	250 ppm
NO	214 ppm	178 ppm	243 ppm
SO ₂	77 ppm	90 ppm	62 ppm
Pump flow	0,91 lt/min	0,95 lt/min	0,93 lt/min

Fuente: Erika Cazorla

Tabla N° 9 Medición 04-10-2012

Fecha: 04-10-2012		variación combustible 2° medición: 12 lt	
Fuel: residuo		variación combustible 3° medición: 11 lt	
Empresa: Cemento Chimborazo C.A.			
T° ambiente: 24°C			
Parámetros	1° medición 10:45 am	2° medición 10:55 am	3° medición 11:15 am
Alimentación	44 ton/h	44 ton/h	44 ton/h
Combustible	2847 lt/h	2835 lt/h	2824 lt/h
Tiro	811 rpm	811 rpm	811 rpm
Velocidad horno	1,35 rpm	1,35 rpm	1,35 rpm
T° horno	1300 °C	1290 °C	1295 °C
Peso litro	1100 g/lt	1100 g/lt	1150 g/lt
O ₂	3,92%	3,96%	4,20%
CO	0,538 %	0,522 %	0,412 %
CO ₂	12,55%	12,54%	12,43%
NO _x	212 ppm	235 ppm	245 ppm
NO	206 ppm	228 ppm	233 ppm
SO ₂	75 ppm	70 ppm	66 ppm
Pump flow	0,95 lt/min	0,97 lt/min	0,96 lt/min

Fuente: Erika Cazorla

Tabla N° 10 Medición 09-10-2012

Fecha: 09-10-2012	
Fuel: residuo	
Empresa: Cemento Chimborazo C.A.	
T° ambiente: 20,7 °C	
Parámetros	1° medición 11:20 am
Alimentación	44 ton/h
Combustible	2890 lt/h
Tiro	799 rpm
Velocidad horno	1,25 rpm
T° horno	1596 °C
Peso litro	1100 g/lt
O ₂	3,31%
CO	1,505 %
CO ₂	12,34%
NO _x	67 ppm
NO	64 ppm
SO ₂	1327 ppm
Pump flow	0,94 lt/min

Fuente: Erika Cazorla

Tabla N° 11 Medición 16-10-2012

Fecha: 16-10-2012		variación combustible 2° medición: 26 lt	
Fuel: residuo		variación combustible 3° medición: 10 lt	
Empresa: Cemento Chimborazo C.A.			
T° ambiente: 21°C			
Parámetros	1° medición 10:20 am	2° medición 10:25 am	3° medición 10:30 am
Alimentación	46 ton/h	46 ton/h	45 ton/h
Combustible	2901 lt/h	2875 lt/h	2865 lt/h
Tiro	807 rpm	807 rpm	807 rpm
Velocidad horno	1,17 rpm	1,17 rpm	1,18 rpm
T° horno	1470 °C	1450 °C	1446 °C
Peso litro	1200 g/lt	1200 g/lt	1200 g/lt
O ₂	3,51%	3,68%	3,44%
CO	0,627 %	0,629 %	0,844 %
CO ₂	12,80%	12,68%	12,70%
NO _x	115 ppm	127 ppm	103 ppm
NO	110 ppm	121 ppm	98 ppm
SO ₂	50 ppm	52 ppm	79 ppm
Pump flow	0,93 lt/min	0,96 lt/min	0,92 lt/min

Fuente: Erika Cazorla

Tabla N° 12 Medición 19-10-2012

Fecha: 19-10-2012		
Fuel: residuo		
Empresa: Cemento Chimborazo C.A.		
T° ambiente: 20,7 °C		
Parámetros	1° medición 10:10 am	2° medición 10:15 am
Alimentación	44 ton/h	44 ton/h
Combustible	2935 lt/h	2945 lt/h
Tiro	806 rpm	806 rpm
Velocidad horno	1,25 rpm	1,25 rpm
T° horno	1318 °C	1345 °C
Peso litro	1260 g/lt	1260 g/lt
O ₂	3,07%	2,48%
CO	1,764 %	2,488 %
CO ₂	12,34%	12,28%
NO _x	25 ppm	-
NO	20 ppm	-
SO ₂	808 ppm	1445 ppm
Pump flow	0,83 lt/min	0,83 lt/min

Fuente: Erika Cazorla

En una planta eficiente no debería existir CO, pero en una planta no tan eficiente como lo es la Cemento Chimborazo, se esperaría tener un CO en un rango aproximado de 0,15%.

Como se puede observar en los datos anteriores, existe un elevado porcentaje de CO en los gases de escape del horno, este es el parámetro más importante que se debe controlar, debido a que mientras más alto sea el porcentaje de CO; el porcentaje de NO_x disminuye y por lo tanto el poder calorífico más bajo será, y como consecuencia la temperatura del horno disminuye y se obtiene un clínker que no estará en condiciones óptimas.

Los NO_x se dividen en:

NO NO térmico

NO₂ aire primario

NO_x NO del combustible

El NO del combustible es el que se está registrando como NO_x, y se observa que en los gases de escape del horno, se encuentra en porcentajes bajos, ya que normalmente debería estar en 500 ppm como mínimo.

2.2 METODOLOGÍA DE TRABAJO

La metodología de trabajo de acuerdo a los objetivos planteados, se fundamentó en la aplicación de dos tipos de investigación: la exploratoria y la evaluativa.

De esta forma, para lograr el primer nivel investigativo, se realizó el análisis de la materia prima para la obtención del clínker, con el objeto de saber que tan fácil de quemar será el material.

2.2.1 MÉTODOS Y TÉCNICAS

Los métodos y técnicas empleados para el desarrollo de esta investigación se llevaron a cabo in situ y en el laboratorio de control de calidad.

2.2.1.1 MÉTODOS

Tabla N° 13 Descripción de los métodos empleados

Determinación	Método de Análisis	Alcance
Determinación de CaCO ₃ (título)	Volumétrico	Determina el % de CaCO ₃ presente en la muestra.
Determinación Química por Rayos X	Espectroscopía	Determinar módulos y saturación de cal.

Fuente: Erika Cazorla

2.2.1.2 TÉCNICAS

2.2.1.2.1 Determinación de CaCO₃ (título)

PROPÓSITO

Determinar correctamente el contenido de carbonato de calcio en una muestra expresado en porcentaje.

ALCANCE

A las muestras de crudo, y calizas

DEFINICIONES

- ◆ **Título.-** Se denomina título de una muestra, al porcentaje de carbonato de calcio presente, referido a su peso seco total.

FRECUENCIA DEL ENSAYO

Cada hora: Producto Molino (Crudo).

Cada dos horas: Alimentación al horno (Crudo Horno) horas pares.

EQUIPO NECESARIO

Solución de ácido clorhídrico 1.0 N.

Solución de hidróxido de sodio 0.50 N.

Erlenmeyer.

Buretas graduadas.

Balanza de precisión.

Plancha térmica (110 - 200 °C)

PROCEDIMIENTO

- ◆ Pesar exactamente 1.0 gr. de muestra seca (polvo), y depositar en un erlenmeyer.
- ◆ Agregar 20 ml de ácido clorhídrico 1.0 N.
- ◆ Someter esta mezcla a ebullición durante un minuto.
- ◆ Enfriar lavando las paredes del erlenmeyer con agua destilada y añadir unas gotas del indicador fenolftaleína.
- ◆ Titular el exceso de ácido clorhídrico que no ha reaccionado con la solución de hidróxido de sodio 0.50 N.

CÁLCULOS

La fórmula a utilizarse es:

$$\text{Título (\%)} = (40 - \text{cc. NaOH utilizados}) \cdot 2.5$$

Los cálculos pueden realizarse también mediante una regla de relación: cc gastados de NaOH - % CO₃Ca, preparada para desestimar constantes de las soluciones y los resultados sean más ágiles.

PUNTOS CRÍTICOS

- ◆ Seguir detenidamente los pasos descritos en el presente procedimiento.
- ◆ La limpieza de los materiales que se utilicen es crítico tanto en elaboración como en control de calidad, de no ser así interferirían directamente en la apreciación en el momento de emitir los resultados.
- ◆ Verificar la homogenización de la muestra antes de realizar el ensayo.

2.2.1.2.2 Determinación Química por Rayos X

PROPÓSITO

Establecer un procedimiento para la determinación correcta de análisis de muestras por rayos x.

ALCANCE

Se aplica esta instrucción al análisis de muestras de arcillas, caliza, crudo, clínker, yeso, puzolana, cemento.

EQUIPOS NECESARIOS

- ◆ Chapas de aluminio.
- ◆ Vibro molino.
- ◆ Prensa Hidráulica.
- ◆ Pinza.
- ◆ Plancha térmica.
- ◆ Bandeja de aluminio.
- ◆ Espectrómetro.

PROCEDIMIENTO

- ◆ Tomar la muestra preparada Caliza, crudo, yeso, puzolana, arcilla (polvo) y cemento.
- ◆ Colocar un anillo de metal en la cámara de muestras de la prensa neumática.
- ◆ Llenar un 90% la cámara de muestras de la prensa neumática con la muestra a analizar.
- ◆ Cerrar y Prensar la muestra con el accionamiento de la prensa pulsando el botón principal.
- ◆ Abrir y accionar la prensa para sacar la muestra prensada (pastilla).
- ◆ Colocar la(s) muestra(s) en el cargador identificando su posición y cerrar la compuerta en el menor tiempo posible.
- ◆ Verificar si se encuentra en el programa Proceso.
- ◆ Trabajar en la computadora y verificar que este abierto MEASUREMENT (Routine Loader).
- ◆ Tabular la identificación (códigos) de la siguiente forma:

Posesionarse en la siguiente casilla que se presenta en blanco y seleccionar con ENTER el programa respectivo considerando:

Materiales	Programa
Arcilla y Puzolana	Arcilla
Caliza (CAP, CAN)	Caliza
Crudo	Crudof
Clinker	Clinker1
Cemento	Cemento
Yeso	Yeso

- ◆ Verificar que este correcta la indicación de códigos y posiciones.
- ◆ Pulsar F10.

FRECUENCIA

Todos los Días Recepción y alimentación (clínker, yeso, arcilla, trituración Primaria, Trituración secundaria.

Dosificación caliza, arcilla, crudo horno y molino, clínker horno, molino, yeso molino, sacos y granel.

Una vez al mes Minas de Puzolana, cemento la competencia (Holcim, Lafarge y Guapan).

Cada dos Horas Producto (cemento 1P, miag 1) horas impares.

PUNTOS CRÍTICOS

- ◆ Seguir detenidamente los pasos descritos en el presente procedimiento.
- ◆ La limpieza de los materiales que se utilicen es crítico tanto en elaboración como en control de calidad.
- ◆ Verificar la homogenización de la muestra antes de realizar el ensayo.

2.3 PUNTOS DE MEDICIÓN

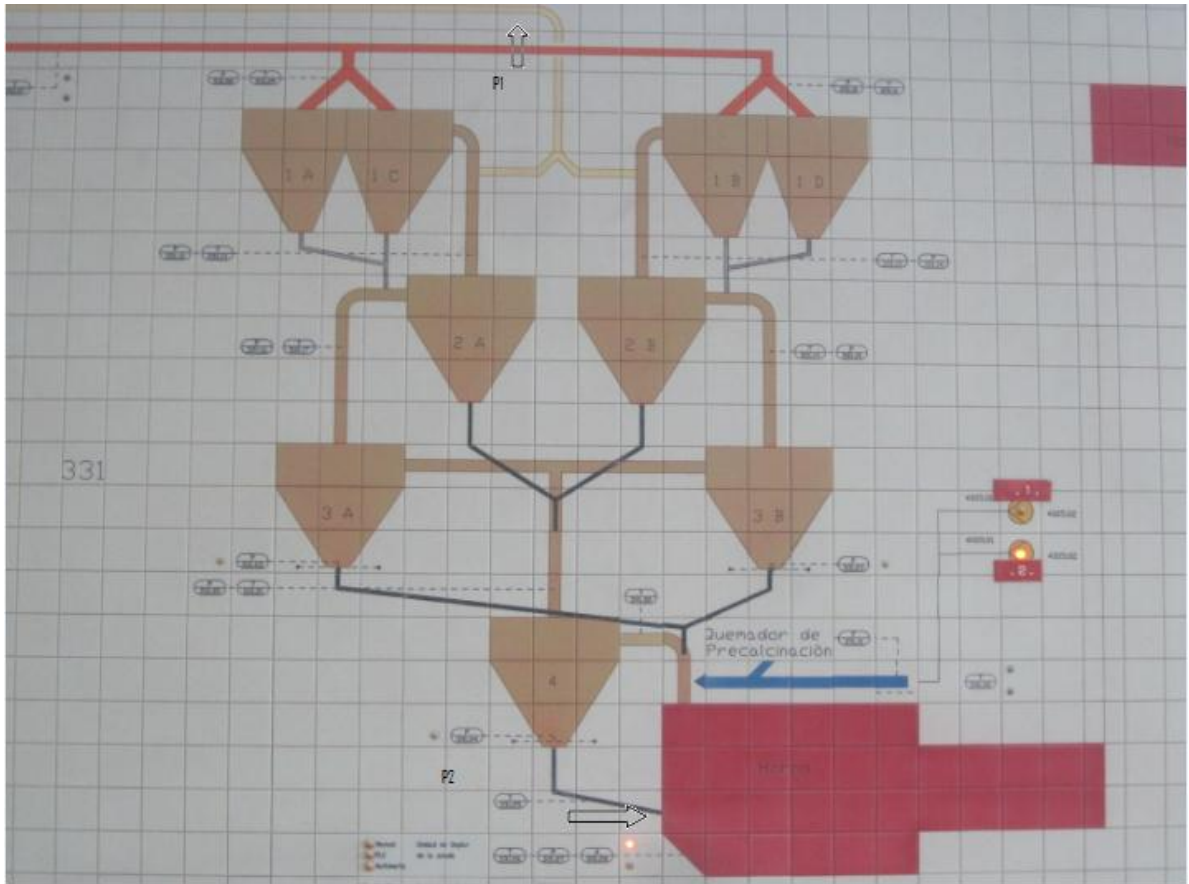


Fig. N° 6 Torre de Precalentamiento y puntos de Medición

P1: Punto de medición N° 1, ducto de succión de gases de escape del horno; medición con el analizador de gases portátil TESTO 350.

P2: Punto de medición N° 2, entrada de crudo al horno; medición con el analizador de gases fijo ITECA SOCADEI.

2.4 DATOS EXPERIMENTALES

2.4.1 DATOS

2.4.1.1 *Datos mensuales obtenidos durante los 4 meses de estudio (4 de Septiembre del 2012 - 12 de enero del 2013)*

Para tabular los datos obtenidos durante los cuatro meses de estudio y promediarlos, se debe tener en cuenta las paradas realizadas durante este tiempo; así tenemos:

Octubre 2012 – PARADA GENERAL

Del 20 al 27 de Octubre del 2012: parada planificada por mantenimiento general.

Cambio de ladrillo refractario en un tramo del horno.

Instalación del analizador de gases fijo ITECA SOCADEI.

27 de Octubre del 2012: Se inicia calentamiento.

28 de Octubre del 2012: Horno en producción.

Del 29 de Octubre al 12 de Noviembre del 2012: calibración y ajustes del analizador de gases fijo, puesta en marcha del analizador de gases fijo.

- A partir del 12 de Noviembre del 2012 se inicia con la toma de datos registrados por el analizador de gases fijo registrados en el cuarto de control hasta el 12 de enero del 2013.
- 07 de Diciembre del 2012: parada por mantenimiento del ventilador 1 y enfriador.

PARÁMETROS ESTABLECIDOS

Tabla N° 14 Parámetros establecidos en la Empresa Cemento Chimborazo

MS: 2.45-2.65	SDC: 93-97	Peso litro: 1200-1250 (g/lit)	CO: 0.15-0.20 %	NO _x : 500 ppm (min.)	Temp. Entrada crudo horno: 760-800 °C
MA: 1.5-1.8	Título: 76.2-76.4	Tiro: 800-875 rpm	O ₂ : 0.7-3.5%	Ex. Aire: 3.5-19	Temp. Aire secundario: 800-1050 °C

Fuente: Erika Cazorla

Tabla N° 15 Datos obtenidos en el mes de Septiembre del 2012 (Variables medidas y Variables Calculadas)

VARIABLES MEDIDAS	4/9/2012	5/9/2012	6/9/2012	7/9/2012	10/9/2012	11/9/2012	12/9/2012	13/9/12	14/9/12	17/9/12	18/9/12	19/9/12	20/9/12	21/9/12	24/9/12	25/9/12	26/9/12	27/9/12	28/9/12	PROMEDIO
MS	2.52	2.47	2.36	2.474	2.58	2.65	2.68	2.68	2.61	2.61	2.59	2.80	2.82	2.68						2.61
MA	1.39	1.39	1.52	1.432	1.50	1.36	1.34	1.34	1.33	1.34	1.36	1.40	1.40	1.44						1.40
SDC	90.57	89.70	88.50	90.64	90.02	90.49	90.91	90.74	89.88	77.17	89.77	91.57	92.02	90.03						89.43
Titulo	76.22	76.00	76.13	76.24	76.18	76.2	76.24	76.29	76.14	76.23	76	76.45	76.52	76.17	76.30	76.37	76.03	76.50	76.42	76.24
Peso litro g/l	1193.85	1205.38	1214.62	1196.67	1220.77	1183.08	1131.54	1173.85	1197.69	1187.69	1267.69	1190.00	1108.33	1200.77	1180.77	2049.23	1252.31	1165.38	1059.23	1230.47
Carga Tm/h	37.54	46.69	48.23	39.42	50.31	49.00	47.08	48.15	50.00	48.77	49.31	47.69	46.92	46.62	47.15	45.08	48.62	45.46	41.92	46.52
Combustible l/h	2785.92	3016.54	3146.23	2703.58	3157.15	3133.54	3096.85	3106.77	3178.54	3158.31	3141.23	3140.69	3069.00	3021.62	3133.62	3029.92	3101.46	2997.46	2860.85	3051.54
Tiro rpm	821.08	834.77	838.62	846.09	843.85	842.54	842.69	840.23	841.08	843.85	862.15	837.23	837.08	837	837	837.69	840.23	839.77	838.54	840.08
Ven. 1 (enfriador Ck) m³/h	1800	1800	1800	1780	1793.08	1800	1800	1793.08	1800	1800	1800	1799.15	1800	1800	1798.85	1800	1800	1800	1800	1798.11
Ven. 2 (enfriador Ck) m³/h	1500	1500	1500	1500	1486.15	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1499.27
Ven. 3 (enfriador Ck) m³/h	1692.46	1648.54	1640.46	1665.55	1636.00	1622.38	1606.69	1631.69	1625.5	1806.46	1853.92	1794.23	3052.77	1823	1828.38	1876.54	1871.23	1792.92	1831.62	1805.28
Ven. 4 (enfriador Ck) m³/h	1492.46	1652.62	1850.08	1803.27	1521.85	1457.62	1364.77	1481.31	2013.00	1939.46	1867.23	1821.38	1758	2940.77	1609.31	1442.46	1373.15	1257.69	1580.54	1696.16
Ven. 5 (enfriador Ck) m³/h	1491	1483.08	1496.08	1508.42	1567.00	1542.15	1388.23	1569.00	1678.69	1389.08	1516.62	1471.38	1492.69	1495.15	1547.85	1460.31	1478.46	1465.77	1338.85	1493.67
Ven. 6 (enfriador Ck) m³/h	1269	1819.08	1832.62	1781	1879.00	1870.08	1815.08	3187.85	2252.46	2744.23	2702.31	2738.62	2597.92	2755.15	2717.92	2737.62	2802.31	2538.31	2770.92	2358.50
Temperatura horno °C	1448.38	1505.62	1517.54	1359.00	1587.15	1543.69	1487.69	1482.62	1556	1489.15	1492.85	1484.46	1494.85	1484.23	1481.62	1476.38	1493.69	1500.54	1435.46	1490.57
Velocidad horno rpm	1.08	1.35	1.39	1.26	1.48	1.42	1.37	1.39	1.43	1.42	1.43	1.43	1.27	1.34	1.45	1.37	1.42	1.27	1.21	1.36
CO %						0.83		0.73		1.12						1.71	1.629			1.20
O2 %						3.38		3.81		3.56						4.01	3.44			3.64
NOx ppm						192.6		235		176						296	185.5			217.02
Temp. entrada Horno °C	754.62	764.08	763.85	683.27	764.69	762.38	760.15	764.54	768.31	763.15	773.46	754.15	737.62	762.15	755.38	764.31	785.31	774.69	763.15	758.91
Temp. aire secundario °C	996.92	1036.92	1049.23	953.64	1056.92	1066.92	980.00	1055.38	1078.46	1044.62	1092.31	1046.15	981.54	1025.38	1040	1070.77	1118.46	1006.15	978.46	1035.70
Presión Caperuza del horno	-4.67	-3.17	-1.60	-2.73	-3.01	-3.08	-3.84	-2.18	-2.33	-1.13	-0.80	-2.70	-3.29	-0.69	-0.82	-1.28	-0.75	-4.27	-2.06	-2.34

VARIABLES CALCULADAS	4/9/2012	5/9/2012	6/9/2012	7/9/2012	10/9/2012	11/9/2012	12/9/2012	13/9/12	14/9/12	17/9/12	18/9/12	19/9/12	20/9/12	21/9/12	24/9/12	25/9/12	26/9/12	27/9/12	28/9/12	PROMEDIO
kg/h	2563.05	2775.22	2894.53	2487.30	2904.58	2882.86	2849.10	2858.23	2924.26	2905.64	2889.93	2889.44	2823.48	2779.89	2882.93	2787.53	2853.34	2757.66	2631.98	2807.42
C (combustible) kg/h	2214.47	2397.79	2500.88	2149.02	2509.56	2490.79	2461.62	2469.51	2526.56	2510.48	2496.90	2496.47	2439.49	2401.82	2490.85	2408.43	2465.29	2382.62	2274.03	2425.61
H2 (combustible) kg/h	309.36	334.97	349.37	300.22	350.58	347.96	343.89	344.99	352.96	350.71	348.81	348.76	340.79	335.53	347.97	336.45	344.40	332.85	317.68	338.86
S (combustible) kg/h	392.15	424.61	442.86	380.56	444.40	441.08	435.91	437.31	447.41	444.56	442.16	442.08	431.99	425.32	441.09	426.49	436.56	421.92	402.69	429.53
T/h Clínter	21.16	26.32	27.18	22.22	28.36	27.62	26.53	27.14	28.18	27.49	27.79	26.88	26.45	26.27	26.58	25.41	27.40	25.62	23.63	26.22
T/d Clínter	507.79	631.62	652.43	533.20	680.53	662.84	636.82	651.39	676.36	659.71	667.00	645.15	634.74	630.58	637.86	609.77	657.63	614.97	567.10	629.34
Consumo de combustible TEORICO	2242.33	2789.13	2881.03	2354.52	3005.09	2926.97	2812.10	2876.43	2986.71	2913.19	2945.35	2848.86	2802.91	2784.53	2816.70	2692.63	2904.00	2715.61	2504.24	2779.07
Consumo energético Kcal/kg Ck	1210.73	1026.91	1036.17	1125.71	997.36	1016.16	1045.37	1025.52	1010.07	1053.40	1012.80	1047.14	1040.94	1030.79	1059.77	1092.56	1013.66	1047.99	1084.11	1051.43
TM de CO2/h	12.55	15.61	16.13	13.18	16.82	16.39	15.74	16.10	16.72	16.31	16.49	15.95	15.69	15.59	15.77	15.07	16.26	15.20	14.02	15.56
TM de CaO/h	15.98	19.87	20.53	16.78	21.41	20.85	20.04	20.49	21.28	20.76	20.99	20.30	19.97	19.84	20.07	19.18	20.69	19.35	17.84	19.80
Combustible gal/h	736.04	796.97	831.24	714.29	834.12	827.88	818.19	820.81	839.77	834.43	829.92	829.77	810.83	798.31	827.90	800.51	819.41	791.93	755.84	806.22
Consumo de gal/TM Ck	35.72	30.30	30.57	33.21	29.43	29.98	30.84	30.26	29.80	31.08	29.88	30.90	30.71	30.41	31.27	32.24	29.91	30.92	31.99	31.02
EXCESO DE AIRE %						18.22		21.06		19.39						22.42	18.61			19.94

Fuente: Erika Cazorla

Tabla N° 16 Datos obtenidos en el mes de octubre del 2012 (Variables medidas y Variables Calculadas)

VARIABLES MEDIDAS	1/10/2012	2/10/2012	3/10/2012	4/10/2012	5/10/2012	8/10/2012	9/10/2012	10/10/2012	11/10/2012	12/10/2012	15/10/12	16/10/12	17/10/12	18/10/12	19/10/12	20/10/12	PROMEDIO
MS	2.52		2.32	2.35	2.29	2.29	2.34	2.42	2.43	2.44	2.26	2.26	2.25	2.16	2.26	2.20	2.320
MA	1.47		1.33	1.43	1.41	1.42	1.40	1.40	1.39	1.415	1.39	1.41	1.42	1.39	1.41	1.39	1.406
SDC	92.4		91.3	92.17	92.11	91.63	93.53	92.08	92.52	92.87	91.32	88.8	92.81	92.03	92.44	91.84	91.991
Titulo	76.29	76.2	75.92	76.17	76.29	76.21	76.17	76.10	76.08	76.08	76	75.96	76.16	76.09	76.23	76.14	76.130
Peso litro g/l	1153.08	1219.09	1153.85	1153.08	1180	1186.92	1075.38	1188.46	1212.31	1223.85	1220	1249.23	1188.46	1238.46	1236.92	1235.38	1194.655
Carga Tm/h	38.231	44.091	35.08	41.69	45.00	45.23	43.08	44.46	45.38	45.92	46.92	44.54	44.62	46.15	44.08	45.23	43.732
Combustible l/h	2660.54	2926.55	2422.15	2804.92	2917.46	3027.85	3054.85	2956.77	2916.69	3006.00	2988.23	2887.692308	2932.31	2990.31	3047.31	2981.08	2907.544
Tiro rpm	837	824.90	797.23	806.92	808.32	805.77	791.08	807.62	808	808.00	811.54	807.23	808.38	805.31	806.62	806.62	808.783
Ven. 1 (enfriador Ck) m³/h	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800
Ven. 2 (enfriador Ck) m³/h	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500
Ven. 3 (enfriador Ck) m³/h	1870.08	1857.4	1745.62	1701.23	1712.85	1697.85	1615.54	1700.31	1688.92	1676.92	1714.77	1671.23	1704.92	1850	1680.15	1682.92	1723.169
Ven. 4 (enfriador Ck) m³/h	1711.31	3271.5	1303.23	1012.46	1134.15	1626.54	1657.77	1547.23	1518.77	1458.23	1598.54	1513.08	1657.31	2685.00	1644.23	1628.38	1685.483
Ven. 5 (enfriador Ck) m³/h	1869.25	1790	1595.31	1638.85	1836.62	1853.77	1559.46	1521.92	1495.69	1451	1476.54	1565.15	2001.54	1952.69	1948.08	1812.23	1710.506
Ven. 6 (enfriador Ck) m³/h	1822.33	1824.91	1906.15	1863.54	1862.31	1886.92	1918.08	1885.92	1913.38	1900.77	1894.31	1839	2605.85	2534.15	2680.85	2700.77	2064.953
Temperatura horno °C	1483.69	1447.09	1435.85	1311.08	1337.00	1525.08	1541.69	1598.46	1562.38	1646.31	1585.38	1484.46	1421.15	1459.23	1404	1471.08	1482.121
Velocidad horno rpm	1.24	1.35	0.93	1.25	1.37	1.28	1.22	1.31	1.32	1.33	1.37	1.25	1.28	3.25	1.25	1.3075	1.394
CO %	0.57			0.49			1.5					0.7			2.13		1.078
O2 %	3.92			4.03			3.31					3.54			2.77		3.514
NOx ppm	218.3			230.6			67					115			25		131.18
Temp. entrada Horno °C	746.62	736	748.31	747.46	737.92	752.77	767.85	776	759.00	791.31	759.31	778.08	766.69	769.38	762	763.15	760.115
Temp. aire secundario °C	984.62	1062	908	957.69	946.15	1055.38	968.46	1046.15	1058.46	1056.92	1030.77	1087.69	1005.38	1091.54	1077.69	1067.69	1025.288
Presión Caperuza del horno	-2.23	-0.72	-1.34	-2.28	-1.88	-2.33	-3.03	-1.11	-0.82	-0.82	-1.05	-1.52	-1.47	-0.97	-1.36	-1.06	-1.499

VARIABLES CALCULADAS	1/10/2012	2/10/2012	3/10/2012	4/10/2012	5/10/2012	8/10/2012	9/10/2012	10/10/2012	11/10/2012	12/10/2012	15/10/12	16/10/12	17/10/12	18/10/12	19/10/12	20/10/12	PROMEDIO
kg/h	2447.70	2692.42	2228.38	2580.53	2684.06	2785.62	2810.46	2720.23	2683.36	2765.52	2749.17	2656.68	2697.72	2751.08	2803.52	2742.59	2674.94
C (combustible) kg/h	2114.81	2326.25	1925.32	2229.58	2319.03	2406.77	2428.24	2350.28	2318.42	2389.41	2375.28	2295.37	2330.83	2376.94	2422.24	2369.60	2311.15
H2 (combustible) kg/h	295.44	324.98	268.97	311.47	323.97	336.22	339.22	328.33	323.88	333.80	331.83	320.66	325.62	332.06	338.39	331.03	322.87
S (combustible) kg/h	374.50	411.94	340.94	394.82	410.66	426.20	430.00	416.19	410.55	423.12	420.62	406.47	412.75	420.92	428.94	419.62	409.27
T/h Clinker	21.55	24.85	19.77	23.50	25.36	25.49	24.28	25.06	25.58	25.88	26.45	25.10	25.15	26.01	24.84	25.49	24.649
T/d Clinker	517.16	596.43	474.50	563.98	608.73	611.85	582.71	601.44	613.93	621.21	634.74	602.48	603.52	624.34	596.24	611.85	591.570
Consumo de combustible TEORICO	2283.68	2633.73	2095.29	2490.46	2688.04	2701.82	2573.16	2655.87	2711.01	2743.18	2802.91	2660.47	2665.06	2756.96	2632.90	2701.82	2612.274
Consumo energético Kcal/kg Ck	1106.71	1061.52	1101.95	1087.59	1030.38	1064.46	1125.70	1060.33	1020.93	1040.11	1012.01	1030.52	1045.48	1029.66	1100.04	1047.38	1060.298
TM de CO2/h	12.78	14.74	11.73	13.94	15.05	15.13	14.40	14.87	15.18	15.36	15.69	14.89	14.92	15.43	14.74	15.13	14.624
TM de CaO/h	16.27	18.77	14.93	17.74	19.15	19.25	18.33	18.92	19.32	19.54	19.97	18.96	18.99	19.64	18.76	19.25	18.612
Combustible gal/h	702.92	773.20	639.93	741.06	770.80	799.96	807.09	721.04	770.59	794.19	789.49	762.93	774.72	790.04	805.10	787.60	764.417
Consumo de gal/TM Ck	32.65	31.32	32.51	32.09	30.40	31.41	33.21	31.20	30.12	30.69	29.86	30.40	30.85	30.38	32.46	30.90	31.278
EXCESO DE AIRE %	21.80			22.56			17.78					19.26			14.43		19.17

Fuente: Erika Cazorla

Tabla N° 17 Datos obtenidos en el mes de noviembre del 2012 (Variables medidas y Variables Calculadas)

VARIABLES MEDIDAS	13/11/2012	14/11/2012	15/11/2012	16/11/2012	19/11/2012	20/11/2012	21/11/2012	22/11/12	23/11/12	26/11/12	27/11/12	28/11/12	29/11/12	30/11/12	PROMEDIO
MS	2.27	2.28	2.33	2.30	2.27	2.28	2.27	2.45	2.44	2.44	2.49	2.37	2.33	2.29	2.34
MA	1.37	1.36	1.34	1.43	1.36	1.48	1.39	1.42	1.42	1.40	1.37	1.33	1.34	1.36	1.38
SDC	92.77	92.07	92.54	91.47	92.73	91.65	91.17	91.29	91.77	91.90	94.03	92.77	92.67	92.87	92.26
Título	75.91	76.26	76.19	76.18	76.23	76	76.09	76.20	76.31	76.20	76.42	76.23	76.22	76.22	76.19
Peso litro g/l	1246.92	1235.38	1243.08	1260	1260.77	1256.15	1225.38	1190.77	1174.62	1172.31	1150.83	1191.54	1204.62	1241.67	1218.15
Carga Tm/h	45.62	40.31	49.54	51.00	46.92	45.31	44.69	47.54	47.92	44.46	44.77	43.77	45.31	45.31	45.89
Combustible l/h	2748.85	2602.77	2909.31	2952.00	2815.77	2850.85	2650.85	2862.77	2896.31	2797.92	2846.00	2769.54	2793.54	2804.46	2807.21
Tiro rpm	872.62	818.85	873.00	875.5	873.54	873.77	876.692	876.92	875.92	865.154	872.692	855.23	865.077	869	867.43
Ven. 1 (enfriador Ck) m³/h	1773.85	1800	1800	1800	1740	1740	1740	1740.00	1740	1740	1700	1700	1676.92	1571.11	1732.99
Ven. 2 (enfriador Ck) m³/h	1500.00	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500.00
Ven. 3 (enfriador Ck) m³/h	1890.77	1928.46	1937.31	1922.08	1358.92	1207.69	1157.62	1339.77	1199.62	1310.38	1266.31	1290.00	1292.31	1259.46	1454.34
Ven. 4 (enfriador Ck) m³/h	1592.69	1358.23	1443.92	1614.00	1688.15	1695.00	1644.77	1639.62	1622.08	2172.38	1169.23	1178.08	1129.08	1540.46	1534.84
Ven. 5 (enfriador Ck) m³/h	1527.69	1520.77	1301.08	1625.08	1584.15	1569.23	1571.92	9682.77	1580.31	1671.69	1449.46	1499.46	1492.15	1442.77	2108.47
Ven. 6 (enfriador Ck) m³/h	1332.31	1393.46	1335.23	881.33	1442.92	1418.31	1412.85	1360.38	1377.92	1419.69	1275.38	1169.85	1037.23	997.69	1275.33
Temperatura horno °C	1545.31	1517.77	1534.62	1520.33	1537.46	1431.77	1513.69	1468.46	1411.38	1473.92	1476.15	1477.00	1520.08	1552.62	1498.61
Velocidad horno rpm	1.30	1.13	1.46	1.45	1.39	1.37	1.33	1.43	1.38	1.26	1.33	1.21	1.29	1.37	1.34
CO %	0.07	0.05	0.67	0.23	0.15	0.04	0.31	0.32	0.06	0.16	0.32	0.13	0.05	0.07	0.19
O2 %	1.46	2.36	0.70	0.99	2.47	2.59	2.39	2.25	1.90	2.83	2.48	2.65	3.13	3.605	2.27
NOx ppm	561.10	898.88	797	711.94	949.76	1210.10	611.58	501.45	558	487.25	365.62	452.58	513.31	543.83	654.46
Temp. entrada Horno °C	759.69	766.23	775.23	776.83	772.92	765.77	773.69	777.00	773.08	757.54	748.08	751.23	745.54	739.08	762.99
Temp. aire secundario °C	1038.46	1026.15	1061.54	1075.00	1066.15	1053.85	1053.85	1030.77	1016.92	927.69	966.15	992.31	984.62	1012.31	1021.84
Presión Caperuza del horno	-1.29	-2.71	-1.39	-2.03	-1.54	-1.61	-0.99	-2.25	-2.24	-1.78	-3.12	-2.1	-1.29	-1.84	-0.16

VARIABLES CALCULADAS	13/11/2012	14/11/2012	15/11/2012	16/11/2012	19/11/2012	20/11/2012	21/11/2012	22/11/12	23/11/12	26/11/12	27/11/12	28/11/12	29/11/12	30/11/12	PROMEDIO
kg/h	2528.94	2394.55	2676.56	2715.84	2590.51	2622.78	2438.78	2633.75	2664.60	2574.09	2618.32	2547.98	2570.06	2580.10	2582.63
C (combustible) kg/h	2185.00	2068.89	2312.55	2346.49	2238.20	2266.08	2107.10	2275.56	2302.22	2224.01	2262.23	2201.45	2220.53	2229.21	2231.39
H2 (combustible) kg/h	305.24	289.02	323.06	327.80	312.67	316.57	294.36	317.89	321.62	310.69	316.03	307.54	310.21	311.42	311.72
S (combustible) kg/h	386.93	366.37	409.51	415.52	396.35	401.29	373.13	402.96	407.68	393.84	400.60	389.84	393.22	394.76	395.14
T/h Clínter	25.71	22.72	27.92	28.75	26.45	25.54	25.19	26.79	27.01	25.06	25.23	24.67	25.54	25.54	25.87
T/d Clínter	617.05	545.25	670.12	689.89	634.74	612.89	604.57	643.07	648.27	601.44	605.61	592.08	612.89	612.89	620.77
Consumo de combustible TEORICO	2724.80	2407.75	2959.14	3046.44	2802.91	2706.42	2669.66	2839.67	2862.65	2655.87	2674.25	2614.52	2706.42	2706.42	2741.21
Consumo energético Kcal/kg Ck	960.80	1030.55	934.98	920.17	954.36	1000.06	942.40	957.40	961.06	1004.64	1012.17	1005.85	980.04	983.45	974.85
TM de CO2/h	15.25	13.48	16.57	17.05	15.69	15.15	14.95	15.90	16.03	14.87	14.97	14.64	15.15	15.15	15.35
TM de CaO/h	19.41	17.15	21.08	21.71	19.97	19.28	19.02	20.23	20.40	18.92	19.05	18.63	19.28	19.28	19.53
Combustible gal/h	726.25	687.65	768.64	779.92	743.93	753.20	700.36	756.35	765.21	739.21	751.92	731.71	738.06	740.94	741.67
Consumo de gal/TM Ck	28.35	30.41	27.59	27.15	28.16	29.51	27.80	28.25	28.36	29.64	29.86	29.68	28.92	29.02	28.76
EXCESO DE AIRE %	7.10	12.01	3.30	4.69	12.69	13.36	12.18	11.42	9.45	14.78	12.70	13.73	16.61	19.69	11.69

Fuente: Erika Cazorla

Tabla N° 18 Datos obtenidos en el mes de diciembre del 2012 (Variables medidas y Variables Calculadas)

VARIABLES MEDIDAS	3/12/2012	4/12/2012	5/12/2012	6/12/2012	11/12/2012	12/12/2012	13/12/12	14/12/12	17/12/12	18/12/12	19/12/12	20/12/12	21/12/12	24/12/12	25/12/12	26/12/12	27/12/12	28/12/12	31/12/12	PROMEDIO
MS	2.46	2.49	2.48	2.49	2.32	2.33	2.33	2.34	2.57	2.53	2.53	2.40	2.42	2.55	2.56	2.55	2.50	2.53	2.63	2.47
MA	1.37	1.38	1.38	1.37	1.45	1.51	1.48	1.46	1.52	1.49	1.50	1.47	1.39	1.44	1.445	1.46	1.48	1.46	1.45	1.45
SDC	92.56	93.07	92.19	92.97	91.58	91.94	92.02	92.42	90.87	90.29	90.87	88.30	89.17	91.23	91.97	91.70	92.05	92.41	92.24	91.57
Titulo	76.30	76.36	76.24	76.29	76.10	76.17	76.14	76.20	76.34	76.24	76.29	75.58	75.77	76.13	76.28	76.21	76.32	76.36	76.31	76.19
Peso litro g/l	1133.08	1190.00	1986.23	1192.31	1243.85	1198.46	1220.00	1231.82	1173.85	1171.54	1162.31	1243.85	1235.38	1210.00	1196.92	1209.23	1159.17	1223.33	1186.92	1240.43
Carga Tm/h	44.55	44	47.77	47.77	46.23	46.23	47	46.64	47.15	46.15	45.46	47.77	45.92	47.08	46.31	47.38	45.67	45.75	47.77	46.45
Combustible l/h	2745.85	2726.17	2851.54	2843.92	2798.46	2824.62	2823.00	2832.00	2881.62	2854.62	2805.31	2896.31	2845.85	2785.77	2778.85	2832.08	2784.08	2789.08	2800.15	2815.75
Tiro rpm	806.92	797	797.077	797	858.00	867.00	868.00	871.55	861.00	861.15	862.62	871.15	877	861	861.00	868.23	865.75	864.58	863.92	851.58
Ven. 1 (enfriador Ck) m³/h	1700	1700	1709.23	1740	1700	1727.69	1700	1700	1730.77	1700	1703.08	1740	1733.85	1700	1700	1724.62	1733.33	1706.67	1740	1715.22
Ven. 2 (enfriador Ck) m³/h	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500.00
Ven. 3 (enfriador Ck) m³/h	1480.77	1502.25	1507.77	1420.62	1554.46	1412.00	1503.62	1467.45	1548.69	1504.54	1851.23	1602.77	1508.62	1677.15	1826.62	2119.92	1631.67	1707.92	2212.85	1633.73
Ven. 4 (enfriador Ck) m³/h	1569.54	1518.33	1507.92	1485.15	1150.69	1185.31	973.69	1247.45	1495.54	1521.92	1479.62	1502.77	1489.46	1505.46	1423.08	1516.92	1498.67	1516.58	1519.92	1426.74
Ven. 5 (enfriador Ck) m³/h	1549.77	1453	1485.23	1453.00	1476.23	1384.85	1486.54	1451.27	1510.31	1556.15	1528.77	1506.62	1496.85	1489.62	1419.92	1615.15	1649.17	1499.42	1557.69	1503.66
Ven. 6 (enfriador Ck) m³/h	1482.85	1234.17	894.54	945.15	1218.54	1313.77	1304.85	1204.09	1376.92	1340	1367.77	1326.46	1399.38	1381.15	1392.38	1494.85	1387.67	1018.50	1082.62	1271.88
Temperatura horno °C	1449.92	1460.17	1509.77	1501.00	1520.92	1517	1488.77	1492.82	1490.15	1501.62	1522.46	1458.15	1539.46	1526.62	1562.23	1489.54	1461.75	1506.75	1476.54	1498.72
Velocidad horno rpm	1.33	1.25	1.38	1.39	1.30	1.46	1.48	1.43	1.37	1.35	1.31	1.36	1.37	1.42	1.39	1.39	1.32	1.31	1.36	1.37
CO %	0.38	0.30	0.89	0.87	0.43	0.35	0.36	0.21	0.85	0.53	0.48	0.77	0.43	0.47	0.33	0.53	0.36	0.26	0.38	0.48
O2 %	2.40	2.62	2.24	2.32	2.25	2.28	2.15	2.50	2.31	2.27	2.66	2.59	2.22	2.18	2.33	2.30	2.19	2.085	2.27	2.32
NOx ppm	365.36	599.67	385.62	419.15	505.38	430.667	336.92	382.82	339.154	410.13	394.59	443.85	347.00	424.23	439.77	401.15	399.58	546.5	524.08	426.09
Temp. entrada Horno °C	730.77	738.83	751.54	745.31	773.15	773.46	771.23	767.36	767.31	770.00	765.62	775.54	788.77	784.77	780.62	767.5	758.83	757.42	777	765.53
Temp. aire secundario °C	976.92	997.5	1038.46	1043.08	1043.08	941.54	978.46	1014.55	1026.92	998.46	1005.38	1024.62	1036.92	1053.85	1026.15	1021.54	980	1035.00	1024.62	1014.06
Presion Caperuza del horno	-1.33	-1.07	-0.44	-0.8975	-1.55	-2.53	-2.18	-1.34	-1.14	-0.61	-1.31	-1.37	-0.97	-1.98	-1.87	-1.38	-1.0625	-0.83	-5.23	-1.53

VARIABLES CALCULADAS	3/12/2012	4/12/2012	5/12/2012	6/12/2012	11/12/2012	12/12/2012	13/12/12	14/12/12	17/12/12	18/12/12	19/12/12	20/12/12	21/12/12	24/12/12	25/12/12	26/12/12	27/12/12	28/12/12	31/12/12	PROMEDIO
kg/h	2526.18	2508.07	2623.42	2616.41	2574.58	2598.65	2597.16	2605.44	2651.09	2626.25	2580.88	2664.60	2618.18	2562.91	2556.54	2605.51	2561.36	2565.96	2576.14	2590.49
C (combustible) kg/h	2182.62	2166.98	2266.63	2260.58	2224.44	2245.23	2243.95	2251.10	2290.54	2269.08	2229.88	2302.22	2262.11	2214.35	2208.85	2251.16	2213.01	2216.99	2225.79	2238.18
H2 (combustible) kg/h	304.91	302.72	316.65	315.80	310.75	313.66	313.48	314.48	319.99	316.99	311.51	321.62	316.01	309.34	308.57	314.49	309.16	309.71	310.94	312.67
S (combustible) kg/h	386.51	383.74	401.38	400.31	393.91	397.59	397.37	398.63	405.62	401.82	394.88	407.68	400.58	392.12	391.15	398.64	391.89	392.59	394.15	396.35
T/h Clinker	25.11	24.80	26.92	26.92	26.06	26.06	26.49	26.29	26.58	26.01	25.62	26.92	25.88	26.53	26.10	26.71	25.74	25.79	26.92	26.18
T/d Clinker	602.60	595.20	646.19	646.19	625.38	625.38	635.78	630.86	637.86	624.34	614.97	646.19	621.21	636.82	626.42	640.98	617.75	618.87	646.19	628.38
Consumo de combustible TEORICO	2660.97	2628.30	2853.46	2853.46	2761.56	2761.56	2807.51	2785.79	2816.70	2756.96	2715.61	2853.46	2743.18	2812.10	2766.15	2830.48	2727.86	2732.84	2853.46	2774.81
Consumo energético Kcal/kg Ck	979.36	985.13	948.53	945.97	962.66	971.86	954.34	965.25	971.03	982.68	980.48	963.92	985.49	940.33	954.00	950.32	969.26	968.77	931.64	963.74
TM de CO2/h	14.90	14.71	15.97	15.97	15.46	15.46	15.72	15.60	15.77	15.43	15.20	15.97	15.36	15.74	15.49	15.85	15.27	15.30	15.97	15.53
TM de CaO/h	18.96	18.73	20.33	20.33	19.68	19.68	20.00	19.85	20.07	19.64	19.35	20.33	19.54	20.04	19.71	20.17	19.44	19.47	20.33	19.77
Combustible gal/h	725.45	720.26	753.38	751.37	739.36	746.27	745.84	748.22	761.33	754.19	741.16	765.21	751.87	736.00	734.17	748.24	735.56	736.88	739.80	743.92
Consumo de gal/TM Ck	28.90	29.07	27.99	27.91	28.40	28.67	28.16	28.48	28.65	28.99	28.93	28.44	29.08	27.74	28.15	28.04	28.60	28.58	27.49	28.43
EXCESO DE AIRE %	12.26	13.56	11.33	11.80	11.41	11.57	10.82	12.84	11.72	11.52	13.80	13.37	11.21	10.99	11.87	11.67	11.05	10.47	11.50	11.83

Fuente: Erika Cazorla

Tabla N° 19 Datos obtenidos en el mes de enero del 2013 (Variables medidas y Variables Calculadas)

VARIABLES MEDIDAS	1/1/2013	2/1/2013	3/1/2013	4/1/2013	7/1/2013	8/1/2013	9/1/2013	12/1/2013	PROMEDIO
MS	2.62	2.638	2.54	2.463	2.50	2.49	2.434	2.34	2.50
MA	1.47	1.49	1.34	1.323	1.41	1.43	1.394	1.41	1.41
SDC	92.34	92.14	91.12	92.1	91.46	91.20	90.814	87.75	91.11
Título	76.28	76.32	76.10	76.267	76.34	76.26	76.16	75.58	76.16
Peso litro g/l	1198.33	1223.64	1227.69	1183.33	1234.62	1214.62	1232.31	1252.31	1220.86
Carga Tm/h	46.08	47.73	46.77	48.000	49.077	47.38	47.692	50.27	47.88
Combustible l/h	2749.83	2810.45	2771.00	2805.50	2874.77	2812.15	2804.231	2839.91	2808.48
Tiro rpm	866.583	865.45	873.85	866.5	866.31	864.077	864.308	868.09	866.90
Ven. 1 (enfriador Ck) m³/h	1700	1729.09	1727.69	1706.667	1730.77	1709.23	1709.231	1725.23	1717.24
Ven. 2 (enfriador Ck) m³/h	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500.00
Ven. 3 (enfriador Ck) m³/h	1814.75	1817.36	2432.77	2405.167	2530.31	2515.38	2477.923	2490.23	2310.49
Ven. 4 (enfriador Ck) m³/h	1523.92	1558.73	1521.62	1542.833	1517.69	1414.69	1616.077	1417.15	1514.09
Ven. 5 (enfriador Ck) m³/h	1584.00	1591.00	1616.31	1548.000	1594.62	1577.38	1560.154	1436.54	1563.50
Ven. 6 (enfriador Ck) m³/h	1295.08	1288.73	1277.00	1261.667	1279.54	1286.92	1294.308	867.15	1231.30
Temperatura horno °C	1555.83	1564.82	1607.38	1533.67	1559.69	1504.38	1564.85	1581.69	1559.04
Velocidad horno rpm	1.33	1.34	1.33	1.380	1.41	1.38	1.382	1.47	1.38
CO %	0.26	0.51	0.32	0.524	0.71	0.58	0.415	0.57	0.49
O2 %	2.30	1.88	2.39	2.513	2.17	2.30	2.025	1.56	2.14
NOx ppm	589.92	556.91	556.92	410.167	385.31	427.62	481.308	459.54	483.46
Temp. entrada Horno °C	773.25	776.27	773.92	780.167	765	783.08	783.154	785	777.48
Temp. aire secundario °C	1018.33	1040.00	1026.15	1053.333	1040	1028.46	1060.000	1040	1038.29
Presión Caperuza del horno	-1.64	-2.68	-1.21	-2.520	-0.94	-1.52	-1.17	-0.68	-1.54

VARIABLES CALCULADAS	1/1/2013	2/1/2013	3/1/2013	4/1/2013	7/1/2013	8/1/2013	9/1/2013	12/1/2013	PROMEDIO
kg/h	2529.85	2585.62	2549.32	2581.06	2644.79	2587.18	2579.89	2612.72	2583.80
C (combustible) kg/h	2185.79	2233.97	2202.61	2230.04	2285.10	2235.32	2229.03	2257.39	2232.41
H2 (combustible) kg/h	305.35	312.08	307.70	311.53	319.23	312.27	311.39	315.35	311.87
S (combustible) kg/h	387.07	395.60	390.05	394.90	404.65	395.84	394.72	399.75	395.32
T/h Clínter	25.97	26.90	26.36	27.055	27.66	26.71	26.88	28.14	26.96
T/d Clínter	623.38	645.62	632.66	649.309	663.88	640.98	645.15	675.32	647.04
Consumo de combustible TEORICO	2752.75	2850.95	2793.72	2867.241	2931.57	2830.48	2848.86	2982.11	2857.21
Consumo energético Kcal/kg Ck	948.41	935.91	941.64	928.884	930.74	943.06	934.87	904.17	933.46
TM de CO2/h	15.41	15.96	15.64	16.051	16.41	15.85	15.95	16.69	16.00
TM de CaO/h	19.61	20.31	19.90	20.429	20.89	20.17	20.30	21.25	20.36
Combustible gal/h	726.51	742.52	732.10	741.215	759.52	742.97	740.88	750.33	742.01
Consumo de gal/TM Ck	27.98	27.61	27.78	27.406	27.46	27.82	27.58	26.68	27.54
EXCESO DE AIRE %	11.70	9.32	12.18	12.92	10.93	11.67	10.14	7.64	10.81

Fuente: Erika Cazorla

2.4.1.2 Datos finales resultantes del estudio de los datos anteriores

Tabla N° 20 Datos finales (Variables medidas y Variables Calculadas)

VARIABLES MEDIDAS	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	PROMEDIO SEP-OCT	NOVIEMBRE	DICIEMBRE	ENERO	PROMEDIO NOV-DIC-ENE
MS	2.61	2.320	2.47	2.34	2.47	2.50	2.440
MA	1.40	1.406	1.40	1.38	1.45	1.41	1.413
SDC	89.43	91.991	90.71	92.26	91.57	91.11	91.650
Titulo	76.18	76.130	76.16	76.19	76.19	76.16	76.182
Peso litro g/lt	1230.47	1194.655	1212.56	1218.15	1240.43	1220.86	1226.478
Carga Tm/h	46.52	43.732	45.13	45.89	46.45	47.88	46.740
Combustible lt/h	3051.54	2907.544	2979.54	2807.21	2815.75	2808.48	2810.480
Tiro rpm	840.08	808.783	824.43	867.43	851.58	866.90	861.966
Ven. 1	1798.11	1800	1799.06	1732.99	1715.22	1717.24	1721.818
Ven. 2	1499.27	1500	1499.64	1500.00	1500.00	1500.00	1500.000
Ven. 3	1805.28	1723.169	1764.23	1454.34	1633.73	2310.49	1799.518
Ven. 4	1696.16	1685.483	1690.82	1534.84	1426.74	1514.09	1491.888
Ven. 5	1493.67	1710.506	1602.09	2108.47	1503.66	1563.50	1725.209
Ven. 6	2358.50	2064.953	2211.73	1275.33	1271.88	1231.30	1259.501
Temperatura horno °C	1490.57	1482.121	1486.35	1498.61	1498.72	1559.04	1518.790
Velocidad horno rpm	1.36	1.394	1.38	1.34	1.37	1.38	1.360
CO %	1.20	1.078	1.14	0.19	0.48	0.49	0.386
O2 %	3.64	3.514	3.58	2.27	2.32	2.14	2.246
NOx ppm	217.02	131.18	174.10	654.46	426.09	483.46	521.334
Temp. entrada Horno °C	758.91	760.115	759.51	762.99	765.53	777.48	768.667
Temp. aire secundario °C	1035.70	1025.288	1030.49	1021.84	1014.06	1038.29	1024.727
Presión Caperuza del horno	-2.34	-1.499	-1.92	-1.76	-1.53	-1.54	-1.61

VARIABLES CALCULADAS	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	PROMEDIO SEP-OCT	NOVIEMBRE	DICIEMBRE	ENERO	PROMEDIO NOV-DIC-ENE
T/h Clíner	26.22	24.649	25.44	25.87	26.18	26.96	26.336
T/d Clíner	629.34	591.570	610.46	620.77	628.38	647.04	632.061
Consumo de combustible TEORICO	2779.07	2612.274	2695.67	2741.21	2774.81	2857.21	2791.076
Consumo energético Kcal/kg Ck	1051.43	1060.298	1055.86	974.85	963.74	933.46	957.349
TM de CO2/h	15.56	14.624	15.09	15.35	15.53	16.00	15.625
TM de CaO/h	19.80	18.612	19.21	19.53	19.77	20.36	19.886
Combustible gal/h	806.22	764.417	785.32	741.67	743.92	742.01	742.532
Consumo de gal/TM Ck	31.02	31.278	31.15	28.76	28.43	27.54	28.246
EXCESO DE AIRE %	19.94	19.170	19.56	11.69	11.83	10.81	11.443

Fuente: Erika Cazorla

2.5 DATOS ADICIONALES

2.5.1 DATOS FÍSICOS DEL CONSUMO DIARIO DE COMBUSTIBLE

Tabla N° 21 Consumo de Combustible Físico – Septiembre 2012

SEPTIEMBRE	4/9/2012	5/9/2012	6/9/2012	7/9/2012	10/9/2012	11/9/2012	12/9/2012	13/9/12	14/9/12	17/9/12
Comb. Diario	14496.44	17920	17270.4	14711.7	18836.36	18091.05	17732.65	18005.4	20552.34	17972.95
	18/9/12	19/9/12	20/9/12	21/9/12	24/9/12	25/9/12	26/9/12	27/9/12	28/9/12	PROMEDIO
Comb. Diario	17920	17834.47	17174.69	16869.24	18058.47	16816.29	18486.11	16832.58	15508.95	17558.929

Fuente: Erika Cazorla

Tabla N° 22 Consumo de Combustible Físico – Octubre 2012

OCTUBRE	1/10/2012	2/10/2012	3/10/2012	4/10/2012	5/10/2012	8/10/2012	9/10/2012	10/10/2012	11/10/2012
Comb. Diario	15304.8	18370.88	14226.97	15614.84	16820.36	16718.55	16494.55	16461.96	16665.6
	12/10/2012	15/10/12	16/10/12	17/10/12	18/10/12	19/10/12	20/10/12	PROMEDIO	
Comb. Diario	16121.13	16885.53	16563.78	16698.18	16054.05	16409.02	9909.28	16297.61222	

Fuente: Erika Cazorla

Tabla N° 23 Consumo de Combustible Físico – Noviembre 2012

NOVIEMBRE	13/11/2012	14/11/2012	15/11/2012	16/11/2012	19/11/2012	20/11/2012	21/11/2012	22/11/12
Comb. Diario	15747.2	14950	17533.15	18443.45	17117.35	16059	15561	16715
	23/11/12	26/11/12	27/11/12	28/11/12	29/11/12	30/11/12	PROMEDIO	
Comb. Diario	16960	15495	15523	15465	16830	17248	16515.8225	

Fuente: Erika Cazorla

Tabla N° 24 Consumo de Combustible Físico – Diciembre 2012

DICIEMBRE	3/12/2012	4/12/2012	5/12/2012	6/12/2012	11/12/2012	12/12/2012	13/12/12	14/12/12	17/12/12	18/12/12
Comb. Diario	16665.48	16810.04	17237.25	17049.14	18039.27	17238.31	17096.7	18132.42	16989.87	16991.64
	19/12/12	20/12/12	21/12/12	24/12/12	25/12/12	26/12/12	27/12/12	28/12/12	31/12/12	PROMEDIO
Comb. Diario	17838.84	17838.84	16912.29	16924.97	16953.76	17117.31	16887.45	15225	16152	17225.012

Fuente: Erika Cazorla

Tabla N° 25 Consumo de Combustible Físico – Enero 2013

ENERO	1/1/2013	2/1/2013	3/1/2013	4/1/2013	7/1/2013	8/1/2013	9/1/2013	12/1/2013	PROMEDIO
Comb. Diario	16853.37	16836.46	16926.29	17161.43	16420.97	16464.46	12603.43	17555.85	16352.7825

Fuente: Erika Cazorla

2.5.2 PRODUCCIÓN MENSUAL / CONSUMO DE COMBUSTIBLE POR TONELADA DE CLÍNKER

Tabla N° 26 Datos Físicos / Producción Mensual

	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Ene.
CLÍNKER (Tm)	16246	13620	15710	18940	18147
COMBUSTIBLE (gal)	30,5	27,5	26,6	25,4	26,12

Fuente: Erika Cazorla

2.5.3 DATOS OBTENIDOS CON EL ANALIZADOR DE GASES TESTO 350 EN EL MES DE DICIEMBRE DEL 2012/ENERO 2013, Y DETERMINACIÓN DE LA INFILTRACIÓN EN EL PRECALENTADOR

Los datos registrados a continuación fueron tomados en el ducto de gases de escape del horno en la primera etapa de la torre de precalentamiento, a fin de determinar la cantidad de aire infiltrado a lo largo del precalentador.

Tabla N° 27 Medición 05-12-2012

Fecha: 05-12-2012		
Fuel: residuo		
Empresa: Cemento Chimborazo C.A.		
T° ambiente: 24,6 °C		
Parámetros	1° medición 11:36 am	2° medición 11:40 am
Alimentación	48 ton/h	48 ton/h
Combustible	2870 lt/h	2870 lt/h
Tiro	797 rpm	797 rpm
Velocidad horno	1,39 rpm	1,39 rpm
T° horno	1550 °C	1547 °C
Peso litro	1230 g/lt	1230 g/lt
O ₂	3,81 %	4,08 %
CO	4072 ppm	2903 ppm
CO ₂	12,73%	12,61%
NO _x	312 ppm	322 ppm
NO	297 ppm	307 ppm
SO ₂	45 ppm	30 ppm
Pump flow	0,98 lt/min	0,97 lt/min

Fuente: Erika Cazorla

$$\sum O_2 = 3,81 + 4,08$$

$$\sum O_2 = 7,89 \%$$

$$Promedio = 3,945 \%$$

Dato adicional

O₂ en la entrada del horno registrado por el analizador de gases fijo: 2,76 %

$$I = \frac{OX_f - OX_o}{20,9 - OX_f} * 100$$

Donde:

I: porcentaje de aire infiltrado (por volumen).

OX_f: porcentaje de oxígeno en el ducto de succión (etapa 1 torre de precalentamiento).

OX_o: porcentaje de oxígeno en la entrada al horno.

$$I = \frac{3,945 - 2,76}{20,9 - 3,945} * 100$$

$$I = 6,99 \%$$

Tabla N° 28 Medición 13-12-2012

Fecha: 13-12-2012		
Fuel: residuo		
Empresa: Cemento Chimborazo C.A.		
T° ambiente: 20,2 °C		
Parámetros	1° medición 10:40 am	2° medición 10:46 am
Alimentación	47 ton/h	47 ton/h
Combustible	2796 lt/h	2796 lt/h
Tiro	868 rpm	868 rpm
Velocidad horno	1,5 rpm	1,5 rpm
T° horno	1500 °C	1506 °C
Peso litro	1190 g/lt	1190 g/lt
O ₂	3,85 %	4,03 %
CO	2607 ppm	763 ppm
CO ₂	11,29 %	9,71 %
NO _x	204 ppm	196 ppm
NO	194 ppm	186 ppm
SO ₂	12 ppm	8 ppm
Pump flow	0,97 lt/min	0,94 lt/min

Fuente: Erika Cazorla

$$\sum O_2 = 3,85 + 4,03$$

$$\sum O_2 = 7,88 \%$$

$$Promedio = 3,94 \%$$

Dato adicional

O₂ en la entrada del horno registrado por el analizador de gases fijo: 2,8 %

$$I = \frac{3,94 - 2,8}{20,9 - 3,94} * 100$$

$$I = 6,72 \%$$

Tabla N° 29 Medición 14-12-2012

Fecha: 14-12-2012		
Fuel: residuo		
Empresa: Cemento Chimborazo C.A.		
T° ambiente: 20,5 °C		
Parámetros	1° medición 12:09 pm	2° medición 12:12 pm
Alimentación	47 ton/h	47 ton/h
Combustible	2807 lt/h	2807 lt/h
Tiro	872 rpm	872 rpm
Velocidad horno	1,42 rpm	1,42 rpm
T° horno	1447 °C	1451 °C
Peso litro	1170 g/lt	1170 g/lt
O ₂	4,59 %	4,67 %
CO	2064 ppm	1081 ppm
CO ₂	12,35 %	12,32 %
NO _x	229 ppm	232 ppm
NO	218 ppm	221 ppm
SO ₂	14 ppm	10 ppm
Pump flow	0,96 lt/min	0,95 lt/min

Fuente: Erika Cazorla

$$\sum O_2 = 4,59 + 4,67$$

$$\sum O_2 = 9,26 \%$$

$$Promedio = 4,63 \%$$

Dato adicional

O₂ en la entrada del horno registrado por el analizador de gases fijo: 2, 53 %

$$I = \frac{4,63 - 2,53}{20,9 - 4,63} * 100$$

$$I = 12,9 \%$$

Tabla N° 30 Medición 17-12-2012

Fecha: 17-12-2012		
Fuel: residuo		
Empresa: Cemento Chimborazo C.A.		
T° ambiente: 25 °C		
Parámetros	1° medición 15:00 pm	2° medición 15:07 pm
Alimentación	46 ton/h	46 ton/h
Combustible	2845 lt/h	2845 lt/h
Tiro	861 rpm	861 rpm
Velocidad horno	1,33 rpm	1,33 rpm
T° horno	1500 °C	1505 °C
Peso litro	1080 g/lt	1080 g/lt
O ₂	4,04 %	3,72 %
CO	2219 ppm	2781 ppm
CO ₂	12,68 %	12,89 %
NO _x	276 ppm	292 ppm
NO	263 ppm	278 ppm
SO ₂	17 ppm	13 ppm
Pump flow	0,96 lt/min	0,95 lt/min

Fuente: Erika Cazorla

$$\sum O_2 = 4,04 + 3,72$$

$$\sum O_2 = 7,76 \%$$

$$Promedio = 3,88 \%$$

Dato adicional

O₂ en la entrada del horno registrado por el analizador de gases fijo: 1,7 %

$$I = \frac{3,88 - 1,7}{20,9 - 3,88} * 100$$

$$I = 12,8 \%$$

Tabla N° 31 Medición 19-12-2012

Fecha: 19-12-2012 Fuel: residuo Empresa: Cemento Chimborazo C.A. T° ambiente: 23 °C	
Parámetros	1° medición 11:00 am
Alimentación	46 ton/h
Combustible	2860 lt/h
Tiro	862 rpm
Velocidad horno	1,36 rpm
T° horno	1519 °C
Peso litro	1230 g/lt
O ₂	3,30 %
CO	3106 ppm
CO ₂	12,2 %
NO _x	283 ppm
NO	275 ppm
SO ₂	23 ppm
Pump flow	0,96 lt/min

Fuente: Erika Cazorla

Dato adicional

O₂ en la entrada del horno registrado por el analizador de gases fijo: 2,8 %

$$I = \frac{3,30 - 2,8}{20,9 - 3,30} * 100$$

$$I = 2,84 \%$$

Tabla N° 32 Medición 20-12-2012

Fecha: 20-12-2012 Fuel: residuo Empresa: Cemento Chimborazo C.A. T° ambiente: 22 °C	
Parámetros	1° medición 17:00 pm
Alimentación	49 ton/h
Combustible	2921 lt/h
Tiro	871 rpm
Velocidad horno	1,4 rpm
T° horno	1479 °C
Peso litro	1250 g/lt
O ₂	3,87 %
CO	2889 ppm
CO ₂	12,34 %
NO _x	296 ppm
NO	287 ppm
SO ₂	18 ppm
Pump flow	0,98 lt/min

Fuente: Erika Cazorla

Dato adicional

O₂ en la entrada del horno registrado por el analizador de gases fijo: 2,9 %

$$I = \frac{3,87 - 2,9}{20,9 - 3,87} * 100$$

$$I = 5,7 \%$$

Tabla N° 33 Medición 24-12-2012

Fecha: 24-12-2012 Fuel: residuo Empresa: Cemento Chimborazo C.A. T° ambiente: 24 °C	
Parámetros	1° medición 12:00 pm
Alimentación	48 ton/h
Combustible	2787 lt/h
Tiro	861 rpm
Velocidad horno	1,42 rpm
T° horno	1529 °C
Peso litro	1200 g/lt
O ₂	3,54 %
CO	3002 ppm
CO ₂	12,61 %
NO _x	289 ppm
NO	280 ppm
SO ₂	26 ppm
Pump flow	0,97 lt/min

Fuente: Erika Cazorla

Dato adicional

O₂ en la entrada del horno registrado por el analizador de gases fijo: 2,02 %

$$I = \frac{3,54 - 2,02}{20,9 - 3,54} * 100$$

$$I = 8,75 \%$$

Tabla N° 34 Medición 26-12-2012

Fecha: 26-12-2012 Fuel: residuo Empresa: Cemento Chimborazo C.A. T° ambiente: 23 °C	
Parámetros	1° medición 12:00 pm
Alimentación	49 ton/h
Combustible	2859 lt/h
Tiro	869 rpm
Velocidad horno	1,43 rpm
T° horno	1470 °C
Peso litro	1170 g/lt
O ₂	3,59 %
CO	3586 ppm
CO ₂	12,24 %
NO _x	210 ppm
NO	201 ppm
SO ₂	31 ppm
Pump flow	0,95 lt/min

Fuente: Erika Cazorla

Dato adicional

O₂ en la entrada del horno registrado por el analizador de gases fijo: 2,01 %

$$I = \frac{3,59 - 2,01}{20,9 - 3,59} * 100$$

$$I = 9,12 \%$$

Tabla N° 35 Medición 27-12-2012

Fecha: 27-12-2012 Fuel: residuo Empresa: Cemento Chimborazo C.A. T° ambiente: 25 °C	
Parámetros	1° medición 13:00 pm
Alimentación	45 ton/h
Combustible	2752 lt/h
Tiro	868 rpm
Velocidad horno	1,28 rpm
T° horno	1490 °C
Peso litro	1000 g/lt
O ₂	3,86 %
CO	1530 ppm
CO ₂	12,23 %
NO _x	186 ppm
NO	178 ppm
SO ₂	19 ppm
Pump flow	0,97 lt/min

Fuente: Erika Cazorla

Dato adicional

O₂ en la entrada del horno registrado por el analizador de gases fijo: 1,89 %

$$I = \frac{3,86 - 1,89}{20,9 - 3,86} * 100$$

$$I = 11,56 \%$$

Tabla N° 36 Medición 02-01-2013

Fecha: 02-01-2013 Fuel: residuo Empresa: Cemento Chimborazo C.A. T° ambiente: 22 °C	
Parámetros	1° medición 12:00 pm
Alimentación	48 ton/h
Combustible	2806 lt/h
Tiro	866 rpm
Velocidad horno	1,35 rpm
T° horno	1576 °C
Peso litro	1230 g/lt
O ₂	3,78 %
CO	3346 ppm
CO ₂	12,30 %
NO _x	298 ppm
NO	291 ppm
SO ₂	28 ppm
Pump flow	0,97 lt/min

Fuente: Erika Cazorla

Dato adicional

O₂ en la entrada del horno registrado por el analizador de gases fijo: 2,19 %

$$I = \frac{3,78 - 2,19}{20,9 - 3,78} * 100$$

$$I = 9,28 \%$$

Tabla N° 37 Medición 03-01-2013

Fecha: 03-01-2013 Fuel: residuo Empresa: Cemento Chimborazo C.A. T° ambiente: 23 °C	
Parámetros	1° medición 13:00 pm
Alimentación	48 ton/h
Combustible	2803 lt/h
Tiro	866 rpm
Velocidad horno	1,38 rpm
T° horno	1598 °C
Peso litro	1280 g/lt
O ₂	3,42 %
CO	3453 ppm
CO ₂	12,36 %
NO _x	368 ppm
NO	359 ppm
SO ₂	35 ppm
Pump flow	0,98 lt/min

Fuente: Erika Cazorla

Dato adicional

O₂ en la entrada del horno registrado por el analizador de gases fijo: 1,48 %

$$I = \frac{3,42 - 1,48}{20,9 - 3,42} * 100$$

$$I = 11,09 \%$$

Tabla N° 38 Medición 07-01-2013

Fecha: 07-01-2013 Fuel: residuo Empresa: Cemento Chimborazo C.A. T° ambiente: 24 °C	
Parámetros	1° medición 10:00 am
Alimentación	49 ton/h
Combustible	2860 lt/h
Tiro	867 rpm
Velocidad horno	1,4 rpm
T° horno	1572 °C
Peso litro	1220 g/lt
O ₂	3,60 %
CO	2557 ppm
CO ₂	12,27 %
NO _x	238 ppm
NO	229 ppm
SO ₂	20 ppm
Pump flow	0,96 lt/min

Fuente: Erika Cazorla

Dato adicional

O₂ en la entrada del horno registrado por el analizador de gases fijo: 2,56 %

$$I = \frac{3,60 - 2,56}{20,9 - 3,60} * 100$$

$$I = 6,01 \%$$

Tabla N° 39 Medición 09-01-2013

Fecha: 09-01-2013 Fuel: residuo Empresa: Cemento Chimborazo C.A. T° ambiente: 22 °C	
Parámetros	1° medición 12:00 pm
Alimentación	49 ton/h
Combustible	2793 lt/h
Tiro	864 rpm
Velocidad horno	1,44 rpm
T° horno	1546 °C
Peso litro	1250 g/lt
O ₂	3,39 %
CO	2975 ppm
CO ₂	12,36 %
NO _x	269 ppm
NO	261 ppm
SO ₂	18 ppm
Pump flow	0,97 lt/min

Fuente: Erika Cazorla

Dato adicional

O₂ en la entrada del horno registrado por el analizador de gases fijo: 1,99 %.

$$I = \frac{3,39 - 1,99}{20,9 - 3,39} * 100$$

$$I = 8 \%$$

Tabla N° 40 Medición 12-01-2013

Fecha: 12-01-2013	
Fuel: residuo	
Empresa: Cemento Chimborazo C.A.	
T° ambiente: 23 °C	
Parámetros	1° medición 12:00 pm
Alimentación	50 ton/h
Combustible	2840 lt/h
Tiro	869 rpm
Velocidad horno	1,48 rpm
T° horno	1550 °C
Peso litro	1280 g/lt
O ₂	3,41 %
CO	1567 ppm
CO ₂	12,27 %
NO _x	251 ppm
NO	243 ppm
SO ₂	19 ppm
Pump flow	0,96 lt/min

Fuente: Erika Cazorla

Dato adicional

O₂ en la entrada del horno registrado por el analizador de gases fijo: 1,76 %

$$I = \frac{3,41 - 1,76}{20,9 - 3,41} * 100$$

$$I = 9,43 \%$$

PROMEDIO DE INFILTRACIÓN DE AIRE

$$\sum I = 6,99 + 6,72 + 12,9 + 12,8 + 2,84 + 5,7 + 8,75 + 9,12 + 11,56 + 9,28$$

$$+ 11,09 + 6,01 + 8 + 9,43$$

$$\sum I = 121,19$$

$$I = 8,65 \%$$

CAPÍTULO III

OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE COMBUSTIÓN

CAPITULO III

3 OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE COMBUSTIÓN

Para la optimización del proceso de combustión en el área de clinkerización se debe tener en cuenta la situación actual del horno, así como, realizar cálculos de ingeniería concernientes al proceso.

3.1 CÁLCULOS

3.1.1 BALANCES DE MATERIA Y ENERGÍA

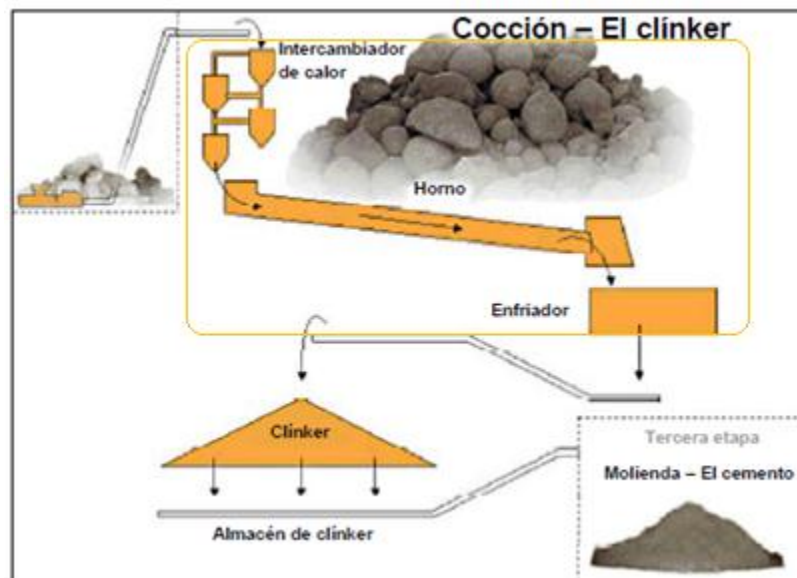


Fig. N° 7 Representación Gráfica Torre de Precalentamiento-Clinkerización-Enfriamiento.

3.1.1.1 *BALANCE DE MATERIA*

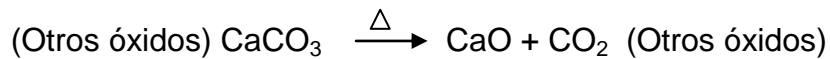
Para realizar el balance de materia, se deben tomar en cuenta varios parámetros.

Se toma como referencia el día 07-01-2013, es un día en el que los parámetros permanecieron estables, así tenemos:

Tabla N° 41 Parámetros 07-01-2013

CARGA Tm/h	49,07
COMBUSTIBLE l/h	2874,77
ρ_r kg/l	0,92
PODER CALORÍFICO comb. Kcal/kg	9733,3
% CaCO ₃ (Título)	76,34
RETORNO	0,93
% O ₂	2,17

Fuente: Erika Cazorla



- **Flujo de gases de combustión**

$$49,07 \frac{\text{Tm crudo}}{h} * \frac{76,34 \text{ Tm CaCO}_3}{100 \text{ Tm crudo}} = 37,46 \frac{\text{Tm CaCO}_3}{h}$$

$$37,46 \frac{\text{Tm CaCO}_3}{h} * \frac{44 \text{ Tm CO}_2}{100 \text{ Tm CaCO}_3} = 16,48 \frac{\text{Tm CO}_2}{h}$$

$$37,46 \frac{\text{Tm CaCO}_3}{h} * \frac{56 \text{ Tm CaO}}{100 \text{ Tm CaCO}_3} = 20,97 \frac{\text{Tm CaO}}{h}$$

$$100 - 76,34 = 23,66$$

$$49,07 \frac{\text{Tm crudo}}{h} * \frac{23,66 \text{ Tm otros óxidos}}{100 \text{ Tm crudo}} = 11,61 \frac{\text{Tm otros óxidos}}{h}$$

$$\left(20,97 \frac{\text{Tm CaO}}{h} * 0,93 \right) + \left(11,61 \frac{\text{Tm otros óxidos}}{h} * 0,93 \right) \\ = 30,29 \text{ Tm clínker}$$

- **Factor CRUDO/CLINKER**

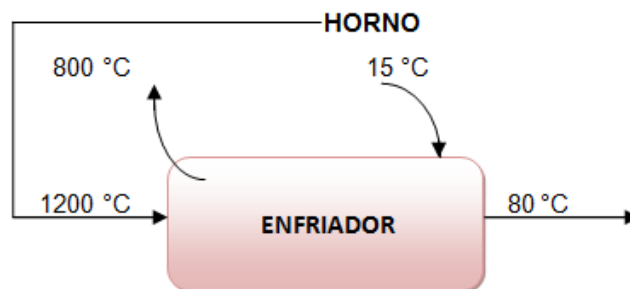
$$\frac{\left(49,07 \frac{\text{Tm crudo}}{h} * 0,93 \right)}{1,65 \frac{\text{Tm crudo}}{\text{Tm clínker}}} = 27,66 \frac{\text{Tm clínker}}{h}$$

3.1.1.2 BALANCE DE ENERGÍA

- Flujo de calor

$$\frac{\left(2874,77 \frac{lt}{h} * 0,92 \frac{kg}{lt} * 9733,3 \frac{kcal}{kg}\right)}{27,66 \frac{Tm \text{ clinker}}{h} * \frac{1000 kg}{1 Tm \text{ clinker}}} = 930,67 \frac{kcal}{kg}$$

Cantidad de aire q necesita el clinker para ser enfriado de 1200 a 100 °C:



Cp clinker

$$m_{clinker} Cp_{1200^{\circ}C} T_E - m_{clinker} Cp_{80^{\circ}C} T_S$$

Para determinar Cp del clinker, se utiliza la ecuación establecida en el Prontuario del Cemento.

$$Cp_{1200^{\circ}C} = (0,76 + 0,000297 t)$$

$$Cp_{1200^{\circ}C} = (0,76 + 0,000297(1200))$$

$$Cp_{1200^{\circ}C} = 1,116 \frac{KJ}{kg \text{ } ^{\circ}C}$$

$$Cp_{100^{\circ}C} = (0,76 + 0,000297 t)$$

$$Cp_{80^{\circ}C} = (0,76 + 0,000297(80))$$

$$Cp_{80^{\circ}C} = 0,789 \frac{KJ}{kg \text{ } ^{\circ}C}$$

$$m_{clinker} (Cp_{1200^{\circ}C} T_E - Cp_{80^{\circ}C} T_S)$$

$$m_{clinker} (1,116 * 1200 - 0,786 * 80)$$

$$m_{clinker} (1276,32)$$

$$27,66 \frac{Tm \text{ clinker}}{h} * \frac{1000 \text{ kg}}{1 Tm \text{ clinker}} = 27660 \frac{\text{kg clinker}}{h}$$

Cp aire

Para calcular la cantidad de aire necesario se necesita saber Cp del aire, que es un valor establecido en el Prontuario del Cemento a condiciones normales.

$$Cp_{aire} = 1,012 \frac{KJ}{Kg \text{ } ^{\circ}C}$$

$$m_{aire} Cp_{aire} T_E - m_{aire} Cp_{aire} T_S$$

$$m_{aire} Cp_{aire} (T_E - T_S)$$

$$m_{aire} 1,012 (800 - 15)$$

$$m_{aire} (794,42)$$

$$m_{clinker} (1276,32) = m_{aire} (794,42)$$

$$m_{aire} = \frac{m_{clinker} (1276,32)}{(794,42)}$$

$$m_{aire} = \frac{27660 (1276,32)}{(794,42)}$$

$$m_{\text{aire}} = 44438,72 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

- **Consumo de combustible**

Análisis del fuel-oil



La cantidad de azufre del combustible (residuo de petróleo) ha sido determinada en el análisis químico del combustible.

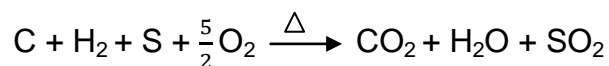
C	→	86,4 %	}	100%
H₂	→	12,07 %		
S	→	1,53 %		

$$2874,77 \frac{\text{lt}}{\text{h}} * 0,92 \frac{\text{kg}}{\text{lt}} = 2644,79 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

$$2644,79 * 0,864 = \mathbf{2285,09 \text{ kg/h C}}$$

$$2644,79 * 0,1207 = \mathbf{319,23 \text{ kg/h H}_2}$$

$$2644,79 * 0,0153 = \mathbf{40,46 \text{ kg/h S}}$$



$$2285,09 \frac{\text{kg C}}{\text{h}} * \frac{1 \text{ mol C}}{12 \text{ kg C}} = 190,42 \frac{\text{mol C}}{\text{h}}$$

$$319,23 \frac{\text{kg H}_2}{\text{h}} * \frac{1 \text{ mol H}_2}{2 \text{ kg H}_2} = 159,61 \frac{\text{mol H}_2}{\text{h}}$$

$$40,46 \frac{\text{kg S}}{\text{h}} * \frac{1 \text{ mol S}}{32 \text{ kg S}} = 1,26 \frac{\text{mol S}}{\text{h}}$$

Para el Carbono:

1 mol de C reacciona con 1 mol O₂

$$190,42 \frac{\text{mol C}}{\text{h}} * \frac{1 \text{ mol O}_2}{1 \text{ mol C}} = 190,42 \frac{\text{mol O}_2}{\text{h}}$$

Para el H₂:

1 mol de H₂ reacciona con 0,5 mol de O₂

$$159,61 \frac{\text{mol H}_2}{\text{h}} * \frac{0,5 \text{ mol O}_2}{1 \text{ mol H}_2} = 79,81 \frac{\text{mol O}_2}{\text{h}}$$

Para el S:

1 mol de S reacciona con 1 mol de O₂

$$1,26 \frac{\text{mol S}}{\text{h}} * \frac{1 \text{ mol O}_2}{1 \text{ mol S}} = 1,26 \frac{\text{mol O}_2}{\text{h}}$$

$$\sum \text{moles O}_2 = (190,42 + 79,81 + 1,26) \frac{\text{mol O}_2}{\text{h}}$$

$$\sum \text{moles O}_2 = 271,49 \frac{\text{mol O}_2}{\text{h}}$$

$$\frac{271,49 \text{ mol O}_2}{\text{h}} * \frac{32 \text{ kg O}_2}{1 \text{ mol O}_2} = 8687,68 \frac{\text{kg O}_2}{\text{h}}$$

$$8687,68 \frac{\text{kg O}_2}{\text{h}} * \frac{1 \text{ kg aire}}{0,209 \text{ kg O}_2} = 41567,85 \frac{\text{kg aire}}{\text{h}}$$

Se recomienda un Exceso de aire de 3,5% según la gráfica de O₂ vs Exceso de Aire del libro The Rotary Cement Kiln (ver Anexo C).

$$\text{Aire total} = \frac{41567,85 \text{ kg aire}}{\text{h}} * 1,035 = 43022,72 \frac{\text{kg aire}}{\text{h}}$$

$$\text{Exceso} = 41567,85 * 0,035 = 1454,87 \text{ Kg O}_2$$

$$\text{Aire total} = \text{Aire Estequiometrico} + \text{Exceso}$$

$$\text{Aire total} = 41567,85 + 1454,87 = 43022,72 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

- **Aire total para la combustión**

Según el catálogo del quemador PILLARD del horno de la Empresa Cemento Chimborazo; el aire primario será 10% y el aire secundario 90%.

$$\text{Aire Primario} = 0,1 * 43022,72 = 4302,27 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

$$\text{Aire Secundario} = 0,9 * 43022,72 = 38720,45 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

$$\begin{aligned} \text{Aire de escape del enfriador al ambiente a traves del filtro} \\ = m_{\text{aire}} - \text{Aire Secundario} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Aire de escape del enfriador al ambiente a traves del filtro} \\ = 44438,72 - 38720,45 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Aire de escape del enfriador al ambiente a traves del filtro} \\ = 5718,27 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \end{aligned}$$

- **Análisis de los gases de escape**

$$\% \text{O}_2 = 2,17 \%$$

$$\text{Exceso de aire} = \frac{100 \text{O}_2}{21 - \text{O}_2} k$$

Donde:

k = 0,95; factor establecido para fuel-oil.

O₂ = oxígeno contenido en los gases de escape del horno.

$$\text{Exceso de aire} = \frac{100(2,17)}{21 - 2,17} (0,95)$$

$$\text{Exceso de aire} = 10,947 \%$$

3.1.1.3 BALANCE DE COSTOS

Para realizar el balance de costos es necesario tomar los datos referenciales de los 4 meses de estudio, así tenemos:

Tabla N° 42 Combustible/Costo

COMBUSTIBLE	Fuel-oil
COSTO	0,72 \$/gal

Fuente: Erika Cazorla

Tomando en cuenta los datos registrados del día 7 de enero del 2013:

$$2874,77 \frac{lt}{h} * \frac{1 gal}{3,785 lt} = 759,516 \frac{gal}{h}$$

$$759,516 \frac{gal}{h} * \frac{h}{27,66 Tm \text{ clínker}} = 27,46 \frac{gal}{Tm \text{ clínker}}$$

$$27,46 \frac{gal}{Tm \text{ clínker}} * \frac{0,72 cvs}{1 gal} = 19,77 \frac{\$}{Tm \text{ clínker}}$$

Los cálculos que se realizan a continuación toman como referencia el consumo energético registrado en la Tabla N° 20.

PROMEDIO SEPTIEMBRE – OCTUBRE (2012)

$$1055,86 \frac{kcal}{kg} * \frac{1 lt}{9733,3 kcal} * \frac{1000 kg}{1 Tm} * \frac{1 gal}{3,785 lt} = 28,66 \frac{gal}{Tm}$$

$$28,66 \frac{gal}{Tm} * \frac{0,72 \$}{1 gal} = 20,64 \frac{\$}{Tm \text{ clínker}}$$

PROMEDIO (NOVIEMBRE – DICIEMBRE) 2012 – ENERO 2013

$$957,349 \frac{kcal}{kg} * \frac{1 lt}{9733,3 kcal} * \frac{1000 kg}{1 Tm} * \frac{1 gal}{3,785 lt} = 25,99 \frac{gal}{Tm}$$

$$25,99 \frac{\text{gal}}{\text{Tm}} * \frac{0,72 \$}{1 \text{ gal}} = 18,71 \frac{\$}{\text{Tm clinker}}$$

AHORRO CONSEGUIDO CON EL ANALIZADOR DE GASES INSTALADO

$$20,64 \$ - 18,71 \$ = 1,93 \frac{\$}{\text{Tm clinker}}$$

Para realizar los siguientes cálculos, se toma como referencia los datos de las Tablas N° 21, 22, 23, 24, 25.

PROMEDIO FÍSICO DE COMBUSTIBLE SEPTIEMBRE 2012

$$17558,929 * 0,72 = 12642,43 \$$$

PROMEDIO FÍSICO DE COMBUSTIBLE OCTUBRE 2012

$$16297,61 * 0,72 = 11734,28 \$$$

PROMEDIO FÍSICO DE COMBUSTIBLE NOVIEMBRE 2012

$$16515,82 * 0,72 = 11891,39 \$$$

PROMEDIO FÍSICO DE COMBUSTIBLE DICIEMBRE 2012

$$17225,01 * 0,72 = 12402,0 \$$$

PROMEDIO FÍSICO DE COMBUSTIBLE ENERO 2013

$$16352,78 * 0,72 = 11774,0 \$$$

Anualmente se tiene programado producir 200000 Tm de clinker; se toma como referencia los datos de la Tabla N° 26.

Con los siguientes cálculos se tendrá más claro el ahorro energético y de combustible que se ha logrado durante los cuatro meses de estudio:

PROMEDIO SEPTIEMBRE – OCTUBRE – NOVIEMBRE – DICIEMBRE

Septiembre: 30,5

Octubre: 27,5

Noviembre: 26,6

Diciembre: 25,4

Promedio: 27,5

CONSUMO ANUAL DE COMBUSTIBLE 2012

$$200000 \frac{Tm \text{ clínker}}{\text{año}} * \frac{27,5 \text{ gal}}{Tm \text{ clínker}} = 5500000 \frac{\text{gal}}{\text{año}}$$

CONSUMO ENERGÉTICO 2012

$$\frac{5500000 \frac{\text{gal}}{\text{año}} * \frac{3,785 \text{ lt}}{1 \text{ gal}} * \frac{0,92 \text{ kg}}{\text{lt}} * \frac{9733,3 \text{ kcal}}{\text{kg}}}{\frac{200000 Tm \text{ clínker}}{\text{año}} * \frac{1000 \text{ kg}}{1 Tm \text{ clínker}}} = 932,06 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$$

CONSUMO ANUAL DE COMBUSTIBLE ESPERADO 2013

$$200000 \frac{Tm \text{ clínker}}{\text{año}} * \frac{26,12 \text{ gal}}{Tm \text{ clínker}} = 5224000 \frac{\text{gal}}{\text{año}}$$

CONSUMO ENERGÉTICO ESPERADO 2013

$$\frac{5224000 \frac{\text{gal}}{\text{año}} * \frac{3,785 \text{ lt}}{1 \text{ gal}} * \frac{0,92 \text{ kg}}{\text{lt}} * \frac{9733,3 \text{ kcal}}{\text{kg}}}{\frac{200000 Tm \text{ clínker}}{\text{año}} * \frac{1000 \text{ kg}}{1 Tm \text{ clínker}}} = 885,29 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$$

3.2 RESULTADOS

Una vez aplicados los cálculos de ingeniería, se obtuvieron los siguientes resultados de importancia para comprobar que se lograron los objetivos planteados:

En el año 2012 se tuvo un consumo aproximado de 5500000 gal. de combustible; es decir $\frac{27,5 \text{ gal}}{\text{Tm clinker}}$ y un consumo energético de $932,06 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$, mientras que se muestra una marcada diferencia solamente en el mes de enero del año 2013 con un consumo de $\frac{26,12 \text{ gal}}{\text{Tm clinker}}$ y un consumo energético de $885,29 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$, es decir, que si se conserva este consumo por Tm de clinker, se esperaría tener en el año 2013, un consumo aproximado de 5224000 gal.

$$5500000 - 5224000 = 276000 \text{ gal.}$$

$$276000 \text{ gal} * \frac{0,72 \$}{1 \text{ gal}} = 198720 \$$$

Del año 2012 al año 2013 se tendría un ahorro significativo de 198720 \$.

El ahorro de 276000 gal/año, además del ahorro en dinero y disminución del costo de producción, evitará la combustión de ese volumen de combustible, lo que disminuye la generación de gases que contribuyen al calentamiento global.

Tabla N° 43 Comparación Diagnóstico Inicial-Condicionales Finales

PARÁMETROS	DIAGNÓSTICO INICIAL	CONDICIONES FINALES
CO %	1,14	0,386
O ₂ %	3,58	2,246
NO _x %	0,017	0,052
Consumo energético Kcal/kg Ck	1055,86	957,349
Consumo gal/TM Ck	31,15	28,246

Fuente: Erika Cazorla

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES

Y

RECOMENDACIONES

CAPITULO IV

4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 CONCLUSIONES

Al finalizar con este proyecto de desarrollo investigativo, y de acuerdo a los objetivos planteados inicialmente podemos concluir:

- El proceso actual de combustión en el área de clinkerización del horno rotativo en la Empresa Cemento Chimborazo, se optimizó mediante la instalación y puesta en marcha del analizador de gases fijo ITECA SOCADEI, a más de la utilización del analizador de gases portátil TESTO 350, con lo cual se consiguió bajar los costos de producción y disminuir la generación de gases.
- En una Combustión eficiente no debería existir CO, sin embargo en el quemador del horno de la fábrica Cemento Chimborazo, su valor óptimo de CO estará entre el 0,15 a 0,20 %; en cuanto a O₂ un mínimo de 0,7 % y máximo 3,5 % y por las condiciones de temperatura de la llama el NO_x sería mínimo 0,05 % de NO_x.

En los meses de septiembre y octubre del año 2012; mediante la utilización del analizador de gases portátil TESTO 350; se obtuvo un promedio en las lecturas de CO: 1,14 %; O₂: 3,58 %; NO_x: 0,017 %.

Con la instalación del analizador fijo ITECA SOCADEI a partir del mes de noviembre del 2012 hasta enero del 2013; se obtuvo un promedio en las lecturas de CO: 0,386 %; O₂: 2,246 %; NO_x: 0,052 %.

- Se determinaron los puntos de medición; para el analizador de gases portátil, el punto de medición fue en el ducto de succión de los gases de escape del horno (primera etapa), mientras que con el analizador de gases fijo el punto de medición fue en la entrada al horno (sitio donde está instalada la sonda de toma de muestra de gases de combustión).
- Se determinó la infiltración de aire mediante las mediciones realizadas con el analizador de gases portátil TESTO 350 en los meses de

diciembre y enero; se obtuvo un valor de 8,65 %, como resultado del promedio determinado de las mediciones durante dichos meses.

- Se redujo el consumo de combustible por tonelada de clínker; según los estudios realizados durante los cuatro meses de investigación; en los meses de septiembre y octubre del 2012: 31,15 gal/ Tm CK; con la instalación y puesta en marcha del analizador de gases portátil a partir del mes de noviembre del 2012 hasta el mes de enero del 2013: 28,24 gal/ Tm CK.

Según datos físicos; en los meses de septiembre y octubre del 2012 se tuvo un consumo de: 29 gal/ Tm CK; mientras que con la instalación y puesta en marcha del analizador de gases fijo a partir del mes de noviembre del 2012 hasta enero del 2013 se tuvo un consumo de: 26,04 gal/ Tm CK.

Se toma como referencia los datos físicos o reales, debido a que los datos resultado del estudio investigativo, no son tan reales porque se ven afectados por diferentes factores tales como paradas no programadas, descostramientos, parada de molino de crudo, daños en el enfriador, daños en el ventilador 1, entre otros.

- Se determinó la disminución en el consumo energético, con valores proyectados para un año tomando en cuenta que cada año la Empresa Cemento Chimborazo tiene programado producir 200000 Tm CK; así, en el año 2012 se tuvo un consumo energético aproximado de 932,06 kcal/kg CK, mientras que se proyecta para el año 2013 un consumo de 885,29 kcal/kg CK.

4.2 RECOMENDACIONES

Para mejorar aún más la combustión en el área de clinkerización se recomienda:

- Realizar una revisión total de la torre de precalentamiento, para cubrir los lugares en donde se detecte infiltración de aire y de esta manera reducir más el consumo de combustible por tonelada métrica de clínker.
- Revisar continuamente la sonda de extracción de gases fija, en caso de ser necesario realizar la limpieza correspondiente, para evitar taponamientos y de esta manera tener resultados sin alteraciones.
- Realizar monitoreos al menos de forma semestral de la emisión de gases de combustión a la atmósfera, para de esta manera controlar y minimizar el impacto ambiental, a más de detectar que se está dentro de parámetros establecidos por la norma.
- Adquirir el equipo necesario para saber con exactitud la cantidad de aire primario y secundario que utiliza el proceso.
- Adquirir periódicamente filtros adecuados para el analizador portátil TESTO 350.
- Realizar de forma semestral los análisis químicos correspondientes al combustible para garantizar una buena combustión.
- Considerar la posibilidad de utilizar combustibles alternativos, para contribuir al ambiente y disminuir costos en combustible y optimizar aún más el proceso.

BIBLIOGRAFÍA

1. **CALLEJA CARRETE, J., Y OTROS.**, Prontuario del Cemento., 5ta ed. Española., Barcelona - España., Reverté S.A., 1985., Pp. 31-33.
2. **CENGEL YUNUS, A.**, Termodinámica., Tomo II., 2da ed., México D.F.- México., Mc. Graw Hill., 1996., Pp. 733-751.
3. **DUDA W.**, Cement data-book International Process Engineering., Pennsylvania - USA., Bauverlag GmbH-Wiesbaden., 1976., Pp. 1-5, 6-10.
4. **KURT E, PERAY.**, The Rotary Cement Kiln., 2da ed., California - USA., Chemical Publishing Co., 1986., Pp. 84-88,141-144, 235-240.

5. **COMBUSTIÓN INDUSTRIAL S.A.**, Revista Científica., Combustión y Clinkerización., Madrid – España., N° 6., C&C., 2006., Pp. 12-14.

6. **ITECA SOCADEI.**, Manual., Analizador de Gas - Manual del Operador., N° 06/04., 2012., Pp. 3-8.

7. **TESTO 350.**, Manual., Manual del Operador., N° 1., 2011., Pp. 1-18.

8. **ECUADOR., DIRECCIÓN METROPOLITANA DEL MEDIOAMBIENTE.**, Ordenanza N° 146., Capítulo III., Norma Técnica para Emisiones a la Atmósfera de Fuentes Fijas de Combustión., Quito-Ecuador., 2005., Pp. 24,25.

9. **E_BOOK_ CENTRO DE ACTIVIDAD REGIONAL PARA LA PRODUCCIÓN LIMPIA.**, Manual de Prevención de la Contaminación en el Sector Cementero., 1ra ed., Barcelona - España., 2008., Pp. 77-78.

<http://www.cprac.org/es/proyectos>

10.E_BOOK_TESTO., Análisis de Gases de Combustión en la Industria., 2da ed., Madrid – España., Pp. 7, 9, 13, 16-18, 56-63.

http://www.testo.com/online/embedded/Sites/ARG/SharedDocuments/Downloads/Guia_emisiones

BIBLIOGRAFÍA INTERNET

11. CLINKERIZACIÓN

<http://www.materialesabel.webhispana.net/cemento/pagcemento/cemclin.htm>

2012-09-10

12. COMBUSTIBLES Y COMBURENTES

<http://materias.fi.uba.ar/6730/Tomo1Unidad1.pdf>

2012-09-24

13. COMBUSTIÓN

<http://es.wikipedia.org/wiki/Combusti%C3%B3n>

2012-10-04

14. CONTAMINACIÓN SECTOR CEMENTERO

<http://www.cprac.org/es/proyectos>

2012-12-08

15. GASES DE COMBUSTIÓN

http://www.testo.com/online/embedded/Sites/ARG/SharedDocuments/Downloads/Guia_emisiones

2012-09-20

16. HORNOS ROTATORIOS

<http://www.metso.com/es/miningandconstruction/mineriayconstruccion.nsf>

2012-10-31

17. REACCIÓN DE COMBUSTIÓN

<http://biolarioja.com.ar/Quimica/capitulos/Capitulo%20XIII.htm>

2012-11-23

18. PRECALCINACIÓN


<http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/Leccion19.CEMENTOS.Precalcinacion.Fundamentos.pdf>

2012-10-01


ANEXOS

ANEXO A

Análisis Químico del Fuel-Oil



UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
 DEPARTAMENTO DE PETRÓLEOS, ENERGÍA Y CONTAMINACIÓN



INFORME DE RESULTADOS
PETROLEO

Informe N° 12-09-01-P-1
 Fecha 2012-09-18

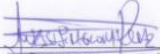
Referencia: OT: 12-09-01-P
Atención: Dra. Margarita Ati
Empresa: CEMENTOS CHIMBORAZO C.A.
Dirección: San Juan Chico Riobamba
Tipo de ensayos: Análisis Físicoquímicos
Tipo de muestra: Bunker
Identificación de la muestra: BUNKER (03-09-2012)
Descripción de la Muestra: Sin descripción específica
Fecha de ingreso de la muestra: 05-09-2012
Muestra tomada por: EL CLIENTE
Código de muestra: OE-12-09-01-P-1
Fecha de realización de ensayos: 05-09-2012/10-09-2012


DETERMINACIÓN	UNIDADES	MÉTODO	RESULTADO
Densidad API a 60° F ⁽¹⁾	°API	PNE/DPEC/P/ASTM D 287	14,5
Azufre*	%P	ASTM D 4294	1,5307
Viscosidad Redwood a 100°F ⁽³⁾	s	ASTM D 88	No determinado
Punto de inflamación ⁽²⁾	°C	PNE/DPEC/P/ASTM D 92	168,1
Poder Calórico Bruto*	kcal/kg	ASTM D 240	10357,2
Poder Calórico Neto*	kcal/kg	Método Interno	9733,3
Agua por destilación*	%V	PNE/DPEC/P/ASTM D 4006	0,048
Sedimento Básico y Agua, BSW ⁽⁴⁾	%V	ASTM D 96	< 1,0

Nota.- Laboratorio de ensayo acreditado por el OAE con acreditación N° OAE LE 2C 06-010
Nota.- Los ensayos marcados con (*) no están incluidos en el alcance de acreditación del OAE
Observaciones: Punto de inflamación está corregido a presión atmosférica 760 mm Hg.
 (1) Incertidumbre asociada a la medida de la Densidad API, $U = \pm 1,0$ °API (K=2)
 (2) Incertidumbre asociada a la medida del Punto de Inflamación $U = \pm 20$ °C (K=2)
 (3) La viscosidad Redwood no se determina ya que el flujo de la muestra durante la elaboración del ensayo no se mantiene constante a la temperatura de 100°F
 (4) El valor del Sedimento Básico y Agua BSW, es menor a la apreciación del tubo de BSW
Condiciones Ambientales.- Presión 546,8 mm Hg; Temperatura: 20,2 °C


Realizado por: CEGL

Revisado Por:


 Ing. Washington Ruiz L.
 RESPONSABLE TÉCNICO



Aprobado Por:


 Ing. Gilberto Moya D., Dpl.
 DIRECTOR DEL LAB. DEL DPEC

ADVERTENCIA: EL USUARIO DEBE EXIGIR EL ORIGINAL. EL DPEC NO SE RESPONSABILIZA POR DOCUMENTOS FOTOCOPIADOS.

Dirección: Francisco Viteri s/n y Gilberto Gato Sobral Teléfono: 2904794 / 2544631 ext. 26 Fax: 2529676 E-mail: dpec@iqtuce.edu.ec
 QUITO - ECUADOR

MC2201-P01-5 Hoja 1 de 1

ANEXO B

Certificado Empresa Cemento Chimborazo C.A.



CERTIFICADO:


A quien interese:

Por el presente, certifico que el Srta. **ERIKA ELIZABETH CAZORLA GARCIA**, portadora de la cédula de ciudadanía N° 06407685-1, realizó su tesis de Grado: "OPTIMIZACION DEL PROCESOS DE CLINKERIZACION MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DEL ANALIZADOR DE GASES TESTO 350", en CEMENTO CHIMBORAZO C.A. en el Área Técnica, desde 13 de Agosto del 2012 hasta el 12 de Enero del 2013.

Es todo cuanto puedo certificar en honor a la verdad.

Riobamba, 27 de Mayo de 2013.

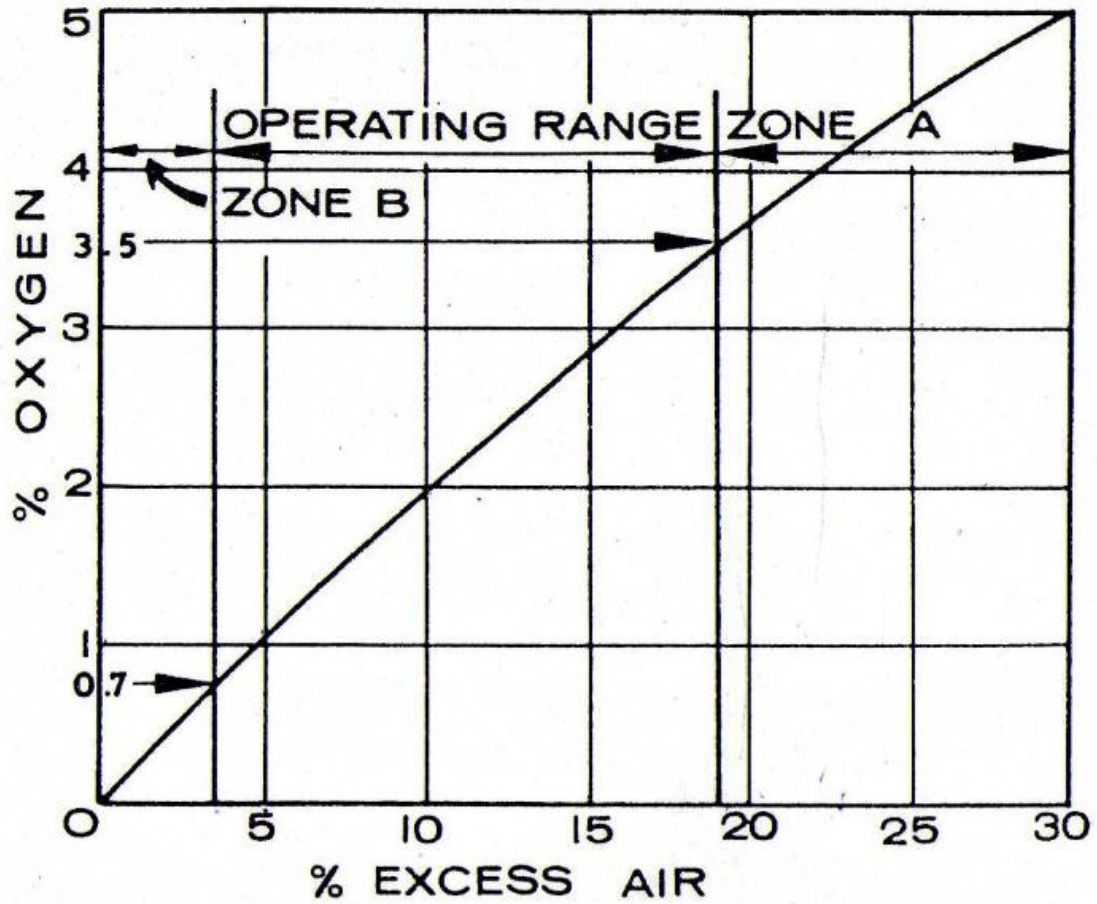
Atentamente,


Dr. Fabricio Viteri M.
**GERENTE TALENTO HUMANO
& D. ORGANIZACIONAL**



ANEXO C

O₂ vs Exceso de Aire



Condiciones ideales de operación en el horno, se producen cuando el gas de salida del horno contiene entre 0,7 y 3,5% de oxígeno. La zona A indica un exceso de aire, resultando en la pérdida excesiva de calor, la Zona B indica una deficiencia de aire, lo que resulta en la formación de monóxido de carbono.

Fuente: The Rotary Cement Kiln

ANEXO D

LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE EMISIONES AL AIRE PARA ELABORACIÓN DE CEMENTO

CONTAMINANTE EMITIDO	OBSERVACIONES	FUENTES EXISTENTES	FUENTES NUEVAS	UNIDADES [1]
Partículas Totales	Horno de clínker	150	50	mg/Nm ³
	Enfriador de clínker	100	50	mg/Nm ³
Óxidos de Nitrógeno	--	1 800	1 300	mg/Nm ³
Dióxido de Azufre	--	800	600	mg/Nm ³

Notas:

[1] mg/m³: miligramos por metro cúbico de gas, a condiciones normales de 1 013 milibares de presión y temperatura de 0 °C, en base seca y corregidos a 7% de oxígeno.

FOTOGRAFÍAS



Foto N°1 Torre de precalentamiento



Foto N°2 Ducto de succión de gases del horno



Foto N°3 Toma de datos-cuarto de control



Foto N°4 Ventilador 1 o de tiro



Foto N°5 Etapas Torre de Pre calentamiento



Foto N°6 Etapa 1-Ducto de succión



Foto N°7 Equipo TESTO 350



Foto N°8 Sonda de gases



Foto N°9 Unión y Filtro-Sonda de Gases



Foto N°10 Conexión TESTO 350-Sonda



Foto N°11 Conexión Filtro-Sonda



Foto N°12 Preparación toma de muestra



Foto N°13 Introducción Sonda de Gases



Foto N°14 Toma de la muestra



Foto N°15 Cabina ITECA SOCADEI



Foto N°16 Datos registrados-ITECA SOCADEI



Fotos N°17 y 18 Filtros del Analizador ITECA SOCADEI



Foto N°19 Sonda ITECA SOCADEI



Foto N°20 Boca del horno-Sonda Introducida



Foto N°21 Salida Sonda ITECA SOCADEI



Foto N°22 Controles Analizador



Foto N°23 Sonda Taponada



Foto N°24 Limpieza Sonda



Foto N°25 Operación Analizador



Foto N°26 Horno Rotativo