



CENTRO DE INVESTIGACION EN MATERIALES AVANZADOS

Control operativo de sistema Precalentador-
Horno-Enfriador en presencia de sustancias
volátiles, al utilizar combustibles alternos.

TESIS que como requisito para obtener el Grado de Maestria
en Ciencia de los Materiales presenta:

ING JUAN ARMANDO RODRÍGUEZ VEGA

CD. JUÁREZ, CHIH.

SEPTIEMBRE, 2012

Control operativo de sistema Precalentador-Horno-Enfriador en
presencia de sustancias volátiles, al utilizar combustibles
alternos.

POR

ING JUAN ARMANDO RODRÍGUEZ VEGA

TESIS GRADO MAESTRIA EN CIENCIA DE LAS MATERIALES

DR. ALBERTO DUARTE MOLLER
INVESTIGADOR TITULAR
DEPARTAMENTO DE MATERIALES NANOESTRUCTURADOS
CIMAV
ASESOR DE TESIS

CIUDAD: JUAREZ, CHIHUAHUA

FECHA: SEPTIEMBRE DEL 2012

A mis padres Armando y Josefina(QPD)
A mi esposa Graciela,
A mis hijas Diana y Erika,
A mis hermanos, hermanas y familiares relativos.

AGRADECIMIENTOS Y/O RECONOCIMIENTOS

Quiero agradecer el apoyo, disposición y entrega de todas las personas que estuvieron involucradas en este proyecto.

Primero que nada a Dios, ya que es quien nos provee de todo lo que necesitamos y sin El nada es posible.

A mi familia, mi esposa Graciela, que siempre esta a mi lado, en los buenos y en los malos momentos. A mis hijas Diana y Erika, que son el motor que me mueve y me motiva a seguir creciendo en lo personal y en lo profesional.

Al Grupo Cementos de Chihuahua, S.A.B de C.V. Planta Samalayuca por haberme dado la oportunidad y los apoyos necesarios para la consolidación de una nueva etapa profesional.

A mi asesor Dr. Alberto Duarte Moller, por compartir conmigo sus conocimientos y experiencias, así como su amistad.

A todos los maestros de CIMAV, que nos compartieron su tiempo y sus conocimientos.

A los Ingenieros Carlos Guardiola, Jesús Guerra y Antonio Sánchez, por apoyarme en la realización de mi Maestría.

A todo el personal de mi empresa, que de una u otra manera se involucraron en el desarrollo de este proyecto.

A mis amigos por su valiosa amistad.

A mis antepasados, padres, hermanos, tíos y sobrinos, y familiares relativos ya que ellos me han ayudado en mi formación personal y profesional.

TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS	x
ÍNDICE DE TABLAS.....	xv
RESUMEN.....	xviii
ABSTRACT.....	xx
GLOSARIO.....	xxii
I. INTRODUCCIÓN	1
II. ANTECEDENTES.....	3
III. OBJETIVOS.....	13
3.1 Objetivo general	13
3.2 Objetivos específicos.....	13
IV. HIPOTESIS.....	13
V. JUSTIFICACION.....	14
VI. METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....	15
6.1 Ingeniería de Proceso	15
6.2 Caracterización química y mineralogía de materias primas, materiales en proceso y clinker.....	16
6.2.1 Composición química	16
6.2.2 Tamaño de partícula y distribución granulometrica..	16
6.2.3 Composición mineralógica	17
6.2.4 Concentración de compuestos minoritarios	17
6.2.5 Afinidad entre los compuestos volátiles	18
6.2.6 Relación molecular álcali-sulfato.....	19
6.2.7 Volatilidad de los elementos circulantes.....	20
6.2.8 El elemento cloro.....	20
6.2.9 Los elementos alcalinos.....	21
6.2.10 Ciclo de elementos circulantes.....	22

6.2.11	Volatilidad de los elementos circulantes.....	23
6.2.12	Volatilidad del cloro.....	25
6.2.13	Volatilidad del azufre.....	25
6.2.14	Análisis de problemas de circulación.....	26
6.2.14.1	Advertencia resultados operativos	26
6.2.14.2	Advertencias ciclo cloro y azufre.....	26
6.2.14.3	Problemas de operación del horno	26
6.2.14.4	Análisis de problemas de circulación.....	27
6.2.14.5	Entradas típicas de elementos circulantes.....	27
6.2.14.6	Limpiezas inteligentes.....	28
6.2.14.7	El elemento azufre	29
6.2.14.8	Límites de control del elemento azufre ...	30
6.2.14.9	Límites de control de elementos alcalinos.	31
6.2.14.10	Límites de control del elemento cloro	31
6.2.14.11	Reacciones de formación y absorción de Azufre	32
6.2.15	Diseño de experimentos 2^k	35
6.2.15.1	Antecedentes.....	35
6.2.15.2	Justificación	36
6.2.15.3	Hipótesis	36
6.2.15.4	Objetivo general.....	36
6.2.15.5	Metodología	36
6.2.15.6	Alternativas para modelos diseño factorial	37
6.2.15.7	Corridas completas para modelo DF 2^k .	37
6.3	Química del proceso de calcinación	38

VII.	RESULTADOS Y DISCUSION	39
	7.1 Planteamiento del problema.....	39
	7.2 Análisis referencial del problema.....	41
	7.3 Resultados obtenidos.....	43
VIII.	CONCLUSIONES.....	100
IX.	LITERATURA CITADA	105

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura		Página
1	Sistema de calcinación Precalentador Horno-Enfriador.....	1
2	Ploteo de producción respecto a dos variables críticas	6
3	Afinidad de elementos circulantes.....	18
4	Ciclo de elementos ciruclantes	22
5	Volatilidad del cloro.....	25
6	Circulación de azufre	25
7	Limpiezas inteligentes.....	28
8	El elemento azufre [Límites de control].....	30
9	Los elementos alcalinos [Límites de control].....	31
10	El elemento cloro [Límite de control].....	31
11	Compuestos de circulación de azufre en el sistema de calcinación..	34
12	Cinética de la formación del clinker.....	38
13	Análisis de medias EVA Vs [SO ₃ , Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃ , SiO ₂].....	44
14	Análisis de medias Al ₂ O ₃ Vs [MA, CaO, ZCk, K ₂ O].....	45
15	Análisis de medias K ₂ O Vs [AT, Na ₂ O, Etapa I, DESC].....	46
16	Análisis de medias EVA Vs [Producción de clinker Tipo 2].....	47
17	Análisis de medias EVA Vs [SiO ₂].....	48
18	Análisis de tendencias TPH, Eva, SO ₃ Vs tiempo.....	49

19	Gráfica de tendencias Eva Vs SO_{3MCR} , SO_{3HM} , SO_{3CK}	50
20	Gráfica de tendencias Temp Etapa I, TBZ, Alimentación.....	51
21	Gráfica de promedios móviles Temp Etapa I, TBZ, Alimentación....	52
22	Gráfica de promedios móviles SO_3 , SO_{3_1} , SO_{3_2}	53
23	Gráfica de promedios móviles Al_2O_3 , CaO, MA, TBZ, TPH.....	54
24	Gráfica de promedios móviles EVA, SO_3 , Fe_2O_3 , SiO_2 , Al_2O_3 , Alim...	55
25	Gráfica de promedios móviles K_2O , AT, Na_2O , Temp Etapa I, Desc, Alimentación Horno.....	56
26	Gráfica Multivarichart EVA Vs SO_3 , SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , Alim.....	57
27	Gráfica varianza Generalizada variables significativas.....	58
28	Gráfica de corrida SO_3 en clinker Tipo 2.....	60
29	Gráfica de corrida Na_2O en clinker Tipo 2.....	61
30	Gráfica de corrida FSC en clinker Tipo 2.....	62
31	Gráfica de corrida Fase Líquida en clinker Tipo 2.....	63
32	Gráfica de Pareto Diseño de Experimentos Alternativa No 1	66
33	Gráfica de Efecto Principal Evaporación Diseño de Experimentos Alternativa No 1	66
34	Gráfica de Efecto Principal Residuo 90 micras Diseño de Experimentos Alternativa No 1	68
35	Gráfica de Efecto Principal Descarbonatación Diseño de Experimentos Alternativa No 1	69
36	Gráfica de Interacción A X C Eva & Descarbonatación Diseño de Experimentos Alternativa No 1.....	70
37	Gráfica de Interacción B X C R90 & Descarbonatación Diseño de Experimentos Alternativa No 1.....	71

38	Gráfica de Interacción A X B Evaporación & R90 Diseño de Experimentos Alternativa No 1.....	72
39	Gráfica de Efecto Principal Evaporación Diseño de Experimentos Alternativa No 2	73
40	Gráfica de Efecto Principal Residuo 90 micras Diseño de Experimentos Alternativa No 2	75
41	Gráfica de Efecto Principal Temperatura Calcinador Diseño de Experimentos Alternativa No 2	76
42	Gráfica de Interacción A X C Eva & Temperatura Calcinador Diseño de Experimentos Alternativa No 2.....	77
43	Gráfica de Interacción A X B Evaporación & R90 Diseño de Experimentos Alternativa No 2.....	78
44	Gráfica de Interacción B X C R90 & Temp Calcinación Diseño de Experimentos Alternativa No 2.....	79
45	Gráfica de Efecto Principal Evaporación Diseño de Experimentos Alternativa No 3	80
46	Gráfica de Efecto Principal Residuo 90 micras Diseño de Experimentos Alternativa No 3	82
47	Gráfica de Efecto Principal Temperatura de Zona de Ck Diseño de Experimentos Alternativa No 3	83
48	Gráfica de Interacción A X C Eva & Temperatura de zona Ck de Diseño Experimentos Alternativa No 3.....	84
49	Gráfica de Interacción A X B Evaporación & R90 Diseño de Experimentos Alternativa No 3.....	85
50	Gráfica de Interacción B X C R90 & TBZ Diseño de Experimentos Alternativa No 3.....	86
51	Gráfica de Contorno de tres dimensiones para límites críticos Compuestos minoritarios.....	96
52	Gráfica de alternos a la fecha.....	97

53	Gráfica de alternos scrap a la fecha.....	97
54	Gráfica de barras, Sustitución de combustible primario por Combustibles alternos.....	99

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla		Página
I	Hoja de análisis de mejora para la definición de la meta	6
II	Relación Molar álcali-azufre.....	19
III	Elementos volátiles.....	20
IV	Puntos de fusión de elementos volátiles.....	22
V	Estabilidad de compuestos minoritarios en función evaporación	24
VI	Advertencia de resultados operativos.....	26
VII	Advertencia de resultados Ciclos de cloro y azufre	26
VIII	Advertencia de problemas en la operación del horno.....	26
IX	Acciones de problemas de Circulación en el horno	27
X	Entrada de elementos circulantes.....	27
XI	El elemento azufre [Características]	29
XII	Reacciones de formación y absorción de azufre.....	32
XIII	Modelo diseño factorial 2^k	36
XIV	Alternativas para Modelos diseño factorial 2^k	37
XV	Corridas completas para Modelos diseño factorial 2^k	37
XVI	Fase de medición.....	42
XVII	Estadística descriptiva pérdida de producción Tipo 2.....	43
XVIII	Análisis de Varianza de DOE, Factorial completo 2^3	64
XIX	Efectos e interacciones de DOE, Factorial completo 2^3	65

XX	Regresión múltiple y ANOVA; EVA [SO ₃ ,Al ₂ O ₃ ,Fe ₂ O ₃ ,SiO ₂ &Al ₂ O ₃ [MA,CaO,ZCK,K ₂ O].....	87
XXI	Regresión múltiple y ANOVA; K ₂ O [AT,Na ₂ O,Etapa 1,DesCO ₂].....	88
XXII	Precontrol Evaporación SO ₃ Ck Tipo 2.....	89
XXIII	Balance de Evaporación SO ₃ Ck Tipo 2.....	90
XXIV	Desbalance de Evaporación SO ₃ Ck Tipo 2.....	92
XXV	Balance de masa SO ₃ Ck Tipo 2.....	94
XXVI	Balance de masa reducción de SO ₃ Ck Tipo 2.....	95
XXVII	Propiedades típicas de combustibles alternos.....	98

RESUMEN

En este trabajo de Tesis, se busca analizar y evaluar la problemática de la baja eficiencia del sistema calcinador-horno bajo las nuevas condiciones químicas de los combustibles alternos, mezclas crudas, y clinker, a través de:

Diseñar y establecer una metodología práctica para el análisis y solución de este tipo de problemas, mediante el uso Diseño de Experimentos, [DOE].

Estudiar y analizar la cinética de combustión de los combustibles alternos, Química del proceso de clinkerización.

Entender y determinar el origen de las causas de la problemática del sistema calcinador-horno.

Definir acciones concretas que se anexen a nuestros procedimientos (plan de calidad , guías de puesto, etc), que aseguren la no recurrencia.

Palabras Clave: Sistema Calcinador-Horno, Combustibles alternos, mezclas crudas, Clinker, Diseño de Experimentos [DOE], Química del proceso de Clinkerización.

ABSTRACT

In this thesis work, we seeks analyze and evaluate the problem of low efficiency of the Precalciner Kiln system under the new conditions, of Alternative fuel, raw mixes, and clinker , through:

Develop and implement a practical methodology for the analyzing and solving such problems, by using Design of Experiments, [DOE].

Study and analyze the kinetics of combustion of the Alternatives fuels, chemical clinkering process.

Understand and determine the root causes of the problem in the Precalciner Kiln system.

Define concrete actions, to be attached our procedures (Quality Plan , operation guidelines, etc), to ensure non-recurrence.

Key word: Precalciner Kiln System, Alternative fuels, Raw mixes, Clinker, Design of Experiments, [DOE]. The process of clinker chemistry.

GLOSARIO

Combustión.- Es la reacción de oxidación del elemento carbono proveniente de los combustibles (carbón mineral o gas natural) por medio del contacto con un comburente que es el oxígeno del aire ambiental en condiciones de temperatura suficiente para su ignición, lo anterior libera energía calorífica.

Calcinación o Descarbonatación.- Es la reacción de la conversión del Carbonato de Calcio (CaCO_3) proveniente de las materias primas, principalmente caliza, en Cal libre y CO_2 , la anterior reacción debe ser llevada a cabo arriba de los 900°C por lo que consume energía calorífica.

Los procesos anteriormente descritos, se llevan a cabo en la torre del precalentador y en el horno, y son controlados por medio de:

Variables de Proceso.- Son los parámetros operativos que el coordinador de Sala de Control, monitorea y controla para mantener el proceso dentro de los estándares normales de operación

Sistema de alimentación de la Llanta.- La llanta es alimentada manualmente a una válvula de doble esclusa, siguiendo un sencillo procedimiento que inicia pesando la llanta para calcular el tiempo de apertura de la puerta de entrada para la siguiente

llanta, se empuja la llanta al interior del dispositivo siguiendo los tiempos calculados por medio de un programador lógico programable (PLC) y un sistema de focos de colores que semeja un semáforo de tráfico vial, donde verde es la acción de meter llanta, amarillo indica el periodo de pesaje y rojo significa que el sistema está parado.

Precaentador.- Es la sección del proceso de calcinación en donde el material "crudo" es precalentado haciendo pasar los gases calientes del horno a contracorriente, a través del flujo de material alimentado para ser este último calentado a los niveles necesarios para llevar a cabo la calcinación del material, para lo anterior es necesario llevar a cabo una combustión inyectando combustible en los quemadores secundarios del precaentador. El precaentador se compone a su vez de 5 etapas que son 5 ciclones para llevar a cabo el intercambio antes mencionado. En la parte baja del precaentador, se tiene la cámara de humos que es la conexión entre el tubo del horno y el calcinador siendo además el punto de integración del dispositivo alimentador de llantas y el punto de pegaduras más frecuente debido al co-procesamiento de llantas, esta cámara de humos es limpiada manualmente por personal entrenado para esta actividad.

Co-procesamiento.- Es la interacción ambientalmente segura de los residuos de una industria o fuente conocida. En el proceso de producción del cemento, a través del co-procesamiento, se aprovecha la energía o componentes de algunos residuos.

La Química en el precalentador.- El precalentador es además un reactor ya que es donde se lleva a cabo la primera reacción del proceso de la calcinación, pero existen también otros elementos que están teniendo otro tipo de reacciones dentro del proceso de calcinación que juegan un papel importante en la correcta operación del sistema. La tarea del co-procesamiento de las llantas, se ve afectada por el tipo de producto que se esté fabricando, cuando se está produciendo clinker nacional, los elementos alcalinos vienen en mayor proporción y se combinan con los sulfatos teniendo un equilibrio adecuado y logran que los sulfatos se fijen en el clinker, cuando los sulfatos no se combinan con los álcalis, pueden convertirse en pegaduras problemáticas para el precalentador. En el caso de producir clinker para exportación, los elementos alcalinos vienen en menor proporción por lo que aquí se rompe el equilibrio con los sulfatos, que al no tener elementos alcalinos que los fijen al clinker y los saquen del

sistema, se vuelven las mencionadas pegaduras problemáticas para el precalentador.

Compuesto minoritario.- Compuestos tales como los elementos alcalinos, el óxido de potasio, K_2O , óxido de sodio, Na_2O , anhídrido de azufre, SO_3 , óxido de magnesio, MgO .

Componentes volátiles.- Sustancias con propiedades especiales, se volatizan y condensan en el sistema del horno y por tanto se acumulan, en el sistema.

Evaporación o volatización.- grado o índice en el cual un elemento químico vaporiza bajo ciertas condiciones de temperatura y presión.

Combustible alternativo.- Son combustibles que no son comercializados en el mercado internacional y son mayormente productos de desecho de origen industrial y doméstico, que tienen un poder calorífico, no establecido y que varía dependiendo del material.

Temperatura de calcinador.- Es una variable importante, que nos asegura, la temperatura a la cual, la mezcla cruda, se desintegra.

Temperatura de la zona de clinkerización .- También conocida con TBZ, por sus siglas en inglés, es la temperatura en la cual se fusionan los componentes mineralógicos, para formación de clinker.

Finura de la mezcla cruda o R_{90} .- En el caso de la mezcla cruda, se utiliza un tamiz de 90 micras o malla 170, y se evalúa el retenido, sobre dicha malla, para evaluar el tamaño de partícula, y así mejorar la aptitud de cocción.

I. INTRODUCCIÓN

El análisis, desde la detección de las áreas de oportunidad hasta la presentación de beneficios tangibles, comprende desde Marzo del 2004 hasta Mayo del 2005.

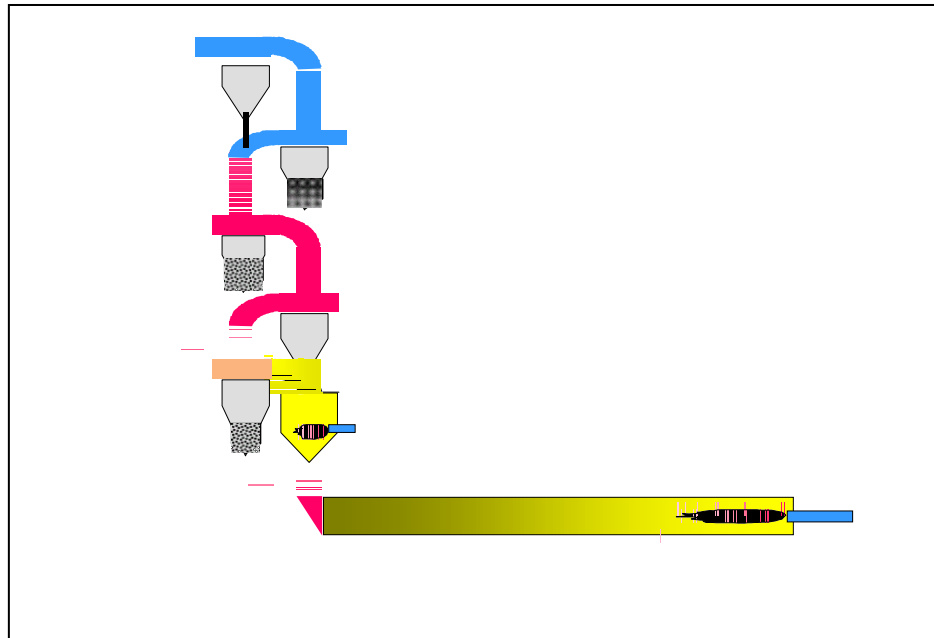


Figura 1 Sistema de Calcinación Precalentador-Horno--Enfriador

Para entender mejor la ubicación del presente nuestro caso, nos situaremos precisamente en el área donde se lleva a cabo el proceso de calcinación Ver figura No. 1.

El proceso de calcinación cuenta con tres equipos principales: 1) El precalentador, 2) El horno y 3) El Enfriador de clinker.

Es en la torre del precalentador y específicamente en su zona inferior (unión con el horno) llamada cámara de humos, en donde se centraron la mayor parte de las actividades desarrolladas en el presente caso y donde se tiene el punto de alimentación de las llantas.

El Municipio de Juárez presenta, desde hace ya varios años, una problemática referente a la acumulación de grandes cantidades de llantas de desecho en el centro de acopio municipal y también dispersas en la mancha urbana; al respecto, la autoridad municipal y otras entidades gubernamentales, del sector académico, de la iniciativa privada y organizaciones de la sociedad civil, hemos venido realizando diversos esfuerzos en la búsqueda de alternativas de solución a dicha problemática, que representa para la comunidad, riesgos ambientales y de salud poblacional. Se ha estimado que entre el centro de acopio y dispersas por la ciudad suman actualmente más de cinco millones de llantas.

La solución de la problemática de las llantas de desecho demandaba la adopción de un sistema integral, que garantice la eliminación de las llantas, de manera eficiente y continua a través

del tiempo. A inicios del mes de Marzo de 2004, GCC Cemento recibe una solicitud formal por parte del Municipio de Juárez, para realizar una prueba de co-procesamiento de llantas, con la finalidad de corroborar lo que en diversos foros internacionales, nacionales y locales se había tenido como conclusión, la alternativa del co-procesamiento de llantas de desecho en hornos de cemento, es una que en términos técnicos, económicos y ambientales sobresalía por su sustentabilidad.

En este contexto, se lleva a cabo la prueba de co-procesamiento de llantas de desecho, durante un periodo de quince días del mes de Marzo de 2004. El reto de GCC Cemento, era de llevar a cabo el co-procesamiento, sin tener afectaciones al proceso de producción de cemento o a la calidad de nuestros productos.

II. ANTECEDENTES

Como se comentó anteriormente, el Municipio de Juárez solicitó a GCC Cemento Planta Samalayuca el que se realizara una prueba industrial en la que se co-procesara llantas de desecho generadas en la comunidad. Fue precisamente en el mes de Marzo de 2004, en que se llevó a cabo dicha prueba, teniendo la operación del sistema de calcinación dos diferentes escenarios, en la primera quincena operó normal, es decir, sin llantas de desecho, y en la

segunda quincena operó alimentándose llantas de desecho por el precalentador. Cabe mencionar que previo a la prueba, no se contaba con experiencia relativa al co-procesamiento de llantas de desecho.

En la figura 2 se muestra un comparativo respecto a la producción de clinker en los dos periodos o escenarios que se tuvieron en Marzo, primeramente el período sin llantas y segundo, el período con alimentación de llantas. El co-procesar llantas trajo consigo una disminución de casi 8 Ton/Hr. De producción de clinker, así como una mayor variabilidad en el proceso.

El Municipio de Juárez, así como diversas entidades de la comunidad, promovieron fuertemente durante el 2003, el co-procesamiento de llantas de desecho en el sistema de calcinación de GCC Cemento Planta Samalayuca, como una alternativa viable para tratar de ir resolviendo el problema que representan los grandes volúmenes de llantas que se encuentran acopiadas y también dispersas en la ciudad. GCC Cemento aceptó realizar una prueba industrial de co-procesamiento para conocer el manejo de llantas y determinar el impacto que se pudiera tener en el proceso de fabricación de cemento y en la calidad de sus productos, prueba que se programa en el mes de Marzo del 2004.

En dicho mes, se operan quince días de manera normal, sin co-procesar llantas y quince días alimentando llantas al proceso de calcinación. El co-procesar llantas generó algunos cambios en el desempeño de la operación, viéndose alterado una serie de variables en la operación, afectando los niveles de producción normales. La calidad de los productos no se vio afectada y se tuvo aprendizaje sobre el manejo de las llantas de desecho.

La situación actual se ubica en fechas de Abril del 2004, posterior a la prueba de co-procesamiento.

En la figura 2, se muestra la caída de producción ploteando dos de las variables críticas que afectan la producción de clinker. Se puede ver la tendencia en la producción cuando se co-procesan llantas de desecho.

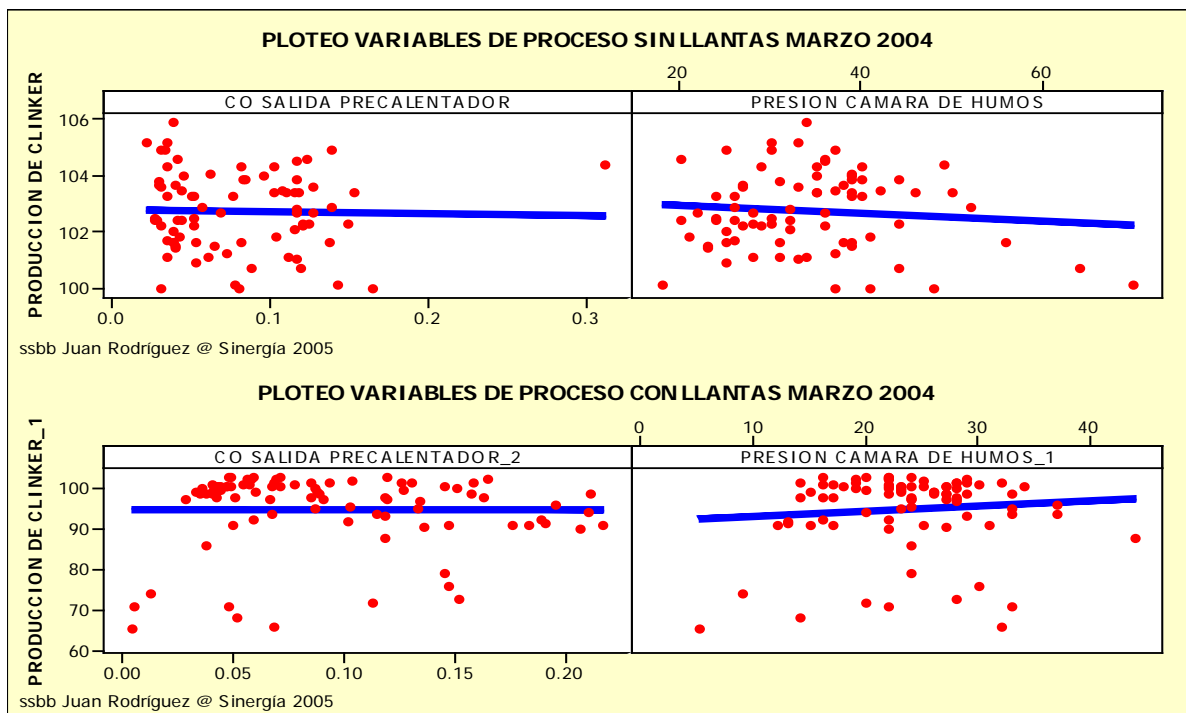


Figura 2. Ploteo de producción respecto a dos variables críticas, en ambos escenarios

El análisis referencial con otras plantas en México y E.U.A. que co-procesan llantas de desecho enteras nos arrojaba que, para la capacidad de nuestro sistema de calcinación era posible llegar a un nivel de co-procesamiento de 45,000 llantas mensuales. Lo anterior y las premisas del inciso c) nos ayudaron a enfocarnos y a establecer una meta real y alcanzable. La tabla No. 1 siguiente muestra la declaración de la misma.

Hoja de análisis de mejora		
Mejora asignada:	Coprocesar 45,000 llantas de desecho mensuales, sin detrimento en la eficiencia y la eficacia de la operación del sistema Precalcinador-horno	
Período	Marzo del 2004 a Mayo del 2005	
Descripción de la mejora		
¿Qué?	Mejora	Coprocesar residuos en planta de cemento
	Producto	Llantas de desecho
	Distinguir	45,000 llantas mensuales
	¿Cuanto?	Coprocesar 45,000 llantas de desecho

		con parámetros estándares de operación similares a operación sin llantas.
¿Dónde?	No es/No debe:	Coproesar cantidades menora a 45,000 llantas o tener operación irregular
	En el Producto:	Clinker Tipo 2
	En el Proceso	Calcinación
	En la planta:	Samalayuca
	Geografía:	Sistema Precalcinador-horno
Acciones contingentes	Primera:	Bajar set point de temperatura calcinador
	Segunda:	Aumentar frecuencia de limpieza en la cámara de humos
Tabla No I Hoja de análisis de mejora para la definición de la meta		

El reto de nuestra compañía, es entender cuales son las causas reales o potenciales que afectan la producción de clinker, al co-procesar llantas de desecho enteras, a continuación se mencionan algunas referencias.

Weatherhead y Blumenthal (1992), del Consejo Administrativo de Desechos de Neumáticos, concluyeron de un reciente estudio de campo que los neumáticos pueden ser usados exitosamente como un combustibe alterno en los hornos de clinker. El costo del combustible es reducido significativamente y la producción es optimizada sin afectar negativamente la calidad del cemento. No se observó un cambio significativo en la calidad del medioambiente debido a emisiones ⁽¹⁾.

⁽¹⁾ Se debe hacer una distinción entre los términos "combustible derivado de neumáticos" y "neumáticos enteros". El

combustible derivado de neumáticos (Tire Derived Fuel (TDF)) se genera con desechos de llantas en combinación con otros combustibles convencionales (carbón, coque de petróleo, aceite, gas, etc.) alimentados en el extremo del quemador y algunos trozos en los calcinadores, mientras que los neumáticos enteros son alimentados en el extremo del precalcinador, en el precalentador del horno o en la zona de calcinación de un horno largo.

El uso de desechos de neumáticos y aceites lubricantes como combustibles alternos en la fabricación de cemento también ha sido reportado en numerosas pruebas de calcinación en Australia y Canadá (McGrath, 1993; y Heron, 1993). Las pruebas mostraron una reducción sustancial en los costos de producción, avances en el tratamiento adecuado y la destrucción de desechos, en el uso de recursos recuperados y un mejor control medioambiental.

De Zorzi (1988) reportó una experiencia en Italia con el uso de desechos sólidos municipales como combustible alternativo en la fabricación de cemento. Las características químicas y físicas del clinker y del cemento fueron muy semejantes a los producidos convencionalmente. No se detectó generación de contaminantes orgánicos o inorgánicos como dioxinas, furanos, SO_x y No_x en las emisiones de la chimenea. No existieron problemas con el manejo del

material, sin embargo, el almacenamiento de los combustibles derivados de desechos (Refuse Derived Fuel (RDF)) fue costoso, porque fue necesario almacenarlos en contenedores totalmente cerrados debido a razones técnicas y medioambientales.

En Noruega, Ingebrigtsen y Haugom (1988) demostraron que el uso de desechos líquidos peligrosos conteniendo bifenilos policlorinados o PCB_s (Polychlorinated biphenyls) como combustible alternativo del horno permitieron resolver eficientemente un difícil problema medioambiental. Se recomendó el uso de un by-pass cuando se utilicen desechos que contengan niveles de cloro por arriba de 0.015%. Krogbeumker (1988) reportó también que los desechos de aceite que contienen PCB_s fueron utilizados como un muy efectivo combustible para el horno por medio de su adecuada atomización en el flujo de gas. Los niveles de dibenzodioxinas policlorinadas y dibenzofuranos en las emisiones fueron muy bajos y ligeramente detectadas. Aunque estas pruebas fueron muy exitosas, actualmente los PCB_s no son quemados en los hornos de clinker de los E.U.A..

Huhta (1990) inspeccionó una veintena de plantas de cemento en Norte América que trabajan con desechos industriales como combustible alternativo y notó que el desecho predominantemente usado era el desecho de aceite, seguido de derivados de solventes y trozos de llantas de autos, así como la viruta de madera y coque. Sin

embargo se prevé que el combustible derivado de neumáticos (TDF) se convertirá en el combustible más ventajoso en un cercano futuro, debido a su gran disponibilidad y fácil manejo.

Kelly (1992) y Mantus y compañía (1992) reportaron que el uso de desechos como combustible alternativo en hornos bien diseñados y adecuadamente operados generan emisiones de metales tan despreciables que no causan ningún efecto negativo en la salud. Se demostró también que los cementos y los polvos de clinker producidos de esta forma no fueron substancialmente diferentes de los producidos convencionalmente. El efecto de las emisiones de compuestos orgánicos y de metales en los hornos que utilizan desechos fue estudiado también por Von Seebach y compañía desde 1990. Se reportó que dentro del horno se efectúa la destrucción completa y la eliminación de compuestos orgánicos peligrosos. Se registró una eficiencia de destrucción y eliminación (Destruction and Removal Efficiency (DRE)) de los compuestos peligrosos del 99.9996 %. Convencionalmente se logran DRE_s de 99.97.

Siemering, Parsons y Lochbrunner (1991) también han reportado sus experiencias en la calcinación de desechos como combustible de los hornos y han reportado tanto ventajas técnicas como ahorros substanciales, con un mínimo impacto medioambiental.

En un reciente artículo, Hansen (1993) ha abogado fuertemente por el uso de desechos sólidos en la fabricación de cemento, enfatizando las potenciales ventajas políticas y medioambientales. Mencionó que el uso de desechos como combustible tiene un doble beneficio medioambiental; no sólo se reduciría o se evitaría la extracción y transportación del combustible fósil, sino además se minimizarían las emisiones que pueden ocurrir por la disposición o el tratamiento de éstos desechos. Políticamente, la obligación del tratamiento de desechos y las exigencias en la reducción de desechos en una sociedad medioambientalmente sensibilizada, como los Estados Unidos, puede ser substancialmente reducida a través de la utilización de los desechos en la fabricación de cemento.

Gossman (1988) señaló algunos de los riesgos y las responsabilidades asociadas con el uso de combustibles derivados de desechos peligrosos y propuso ciertos medios analíticos para reducir los riesgos y lograr grandes ventajas económicas y en el control de calidad.

A pesar de que existen oportunidades para utilizar benéficamente desechos en la producción de cemento, la substitución total en esta industria está todavía en las fases experimentales. Una recomendación ha sido limitar el uso de desechos hasta un 5% en peso de la alimentación cruda (Vogel y compañía, 1987).

Huhta (1990) y Von Seebach y compañía (1990) han reportado una sustitución óptima de 20-30%, o ligeramente superior, del combustible de los hornos de clinker por desechos industriales; algunas plantas ya han logrado una sustitución del 50-100%. No obstante, el nivel de sustitución y el éxito alcanzable depende en gran medida de la composición de los desechos respecto del tipo y concentración de los elementos químicos presentes.

En resumen, bajo condiciones adecuadas, el coprocesamiento de residuos, puede tener los siguientes beneficios:

1. Responder a las presiones medioambientales y comerciales sobre el uso de materias primas alternas y desechos industriales.
2. Recuperar la energía potencial de los desechos.
3. Conservar las materias primas no renovables y los combustibles fósiles.
4. Mejorar la eficiencia de los procesos.
5. Producir mezclas crudas más reactivas.
6. Producir cemento de mejor calidad.
7. Reducir las emisiones de CO₂.

III. OBJETIVOS

3.1 Objetivo general

Analizar y evaluar la problemática de baja eficiencia del sistema calcinador-horno, bajo las nuevas condiciones químicas de los combustibles alternos, mezclas crudas, materiales en proceso y clinker.

3.2 Objetivos específicos

3.2.1 Entender y determinar el origen de las causas de la problemática del sistema Calcinador-Horno.

3.2.2 Establecer e implementar las estrategias necesarias para el seguimiento y la solución de la problemática.

3.2.3 Implementar este método de análisis al proceso de fabricación del cemento portland gris.

3.2.4 Definir acciones concretas que se anexen a los procedimientos [Plan de Calidad, guías de puesto, etc], asegurando la no recurrencia

IV. HIPOTESIS:

La problemática del sistema calcinador-horno se deban a cambios en la mineralogía de las materias primas, o cambios químicos, físicos y mineralógicos no controlados en los materiales en proceso, a la introducción de combustibles alternos [llantas de desecho enteras y/o trituradas] y al uso de mineralizantes no tradicionales [Fluorita].

V. JUSTIFICACION:

- 5.1 El impacto de estos problemas o situaciones no deseadas sobre la eficiencia, del Horno; se encamina directamente sobre los costos de producción de Clíinker.

VI. METODOLOGIA EXPERIMENTAL:

En este capítulo se presenta en detalle la información relacionada con los materiales, métodos y diseño de experimentos realizado.

Los análisis químicos fueron realizados por fluorescencia de rayos X, mediante espectrómetro cubix XRF Panalitical. Las determinaciones de descarbonatación cono de la etapa I, mediante balanza analítica AB 204 Mettler y mufla Thermolyne serie 47900. Las cales libres, mediante parrilla eléctrica precisión integrado con refrigerantes. Las finuras, mediante Malla No 170 y Malla No 70. Todos los análisis fueron realizados utilizando los procedimientos e instrucciones de trabajo de nuestro plan de calidad.

Debido a la complejidad del problema, se aplicaron los siguientes Métodos: Ingeniería de proceso, Caracterización química y mineralogía de materias primas, materiales en proceso y clínker, Química del proceso de clinkerización.

6.1 Ingeniería de proceso

La importancia de este análisis radica el observar como se comporta nuestro proceso en función de los cambios e innovaciones que se han venido dando desde su inicio hasta nuestros días. Por ejemplo: Cambio de combustibles de gas a combustóleo, de combustóleo a

carbón, y por último la utilización de neumáticos usados como combustible alternativo. En el caso de crudo tipo I el uso de CaF_2 como mineralizante. Sin duda alguna bajo esta problemática el sistema calcinador-horno presenta, síntomas que se manifiestan en cambios de los parámetros y variables de Operación.

6.2 Caracterización química y mineralogía de materias primas, materiales en proceso y clínker.

En acuerdo al impacto de cada uno de estos factores sobre la reactividad, se hace el orden de estudio y análisis sobre la problemática.

6.2.1 Composición química.

Forma de control diario Factor de saturación de cal, FSC, módulo de sílice, MS, módulo de alúmina, MA y alcalis totales, AE. La composición química del crudo se realizó por medio de espectrometro cubix XRF Panalitica de planta Samalayuca.

6.2.2 Tamaño de partícula y distribución granulométrica.

La cinética de reacción de una mezcla cruda esta fuertemente influenciada por el área interfacial es

decir: La aptitud a la cocción de un crudo mejora con el área interfacial del crudo.

6.2.3 Composición mineralógica.

Los desordenes cristalinos que presenten los minerales que forman un crudo, nos darán una idea clara sobre su comportamiento durante el tratamiento térmico (clinkerización).

6.2.4 Concentración de compuestos minoritarios.

Compuestos como K_2O , Na_2O , SO_3 , TiO_2 y otros compuestos metálicos pueden estar presentes en el crudo, y pueden venir de los combustibles primarios o alternos, así como de las materias primas utilizadas:

Afinidad de los elementos circulantes:

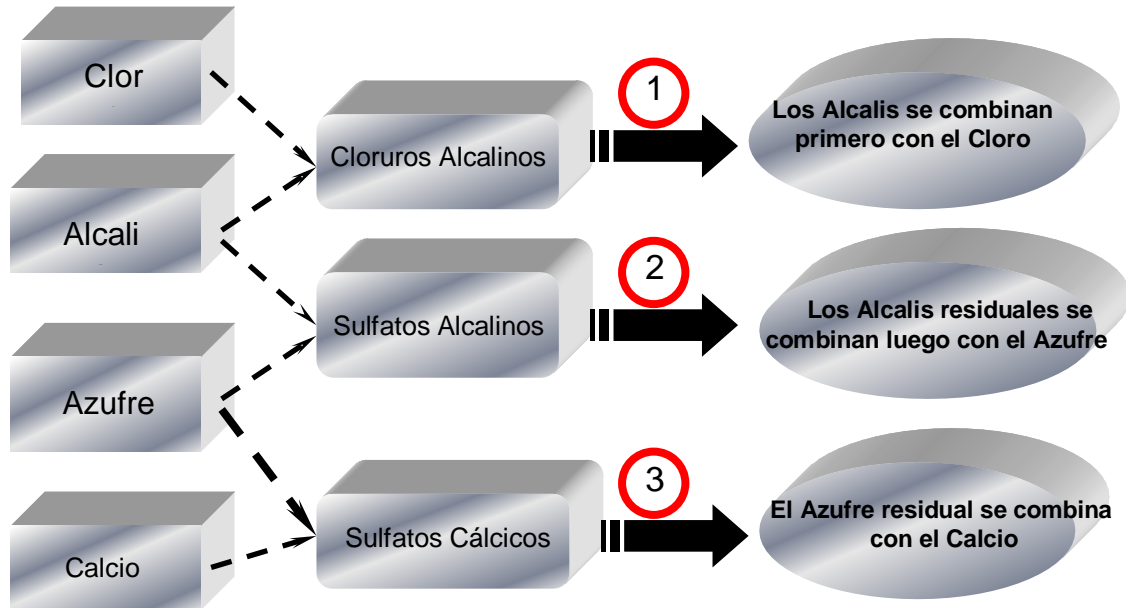


Figura No. 3 Afinidad de elementos circulantes

6.2.5 Afinidad entre los componentes volátiles

La volatilidad de los diferentes compuestos difiere mucho entre sí, y con ésta, la volatilidad de los elementos en los compuestos.

Por ejemplo: KCl puede evaporarse cerca del 100% en la zona de clinkerización, el potasio combinado con sulfato (K_2SO_4) en gran parte puede abandonar el horno dentro del clinker.

El cloro reacciona principalmente con los álcalis, formando NaCl y KCl. Cualquier cloruro en exceso, $CaCl_2$

Una parte de los álcalis, se combina con el sulfuro para formar Na_2SO_4 , K_2SO_4 y sales dobles como $Ca_2K_2(SO_4)_2$.

Los álcalis no combinados con el cloruro o con el sulfuro pueden presentarse como Na_2O y K_2O embebidos en el clinker.

El sulfuro se combina con CaO para formar CaSO₄.

Los compuestos de K₂SO₄ y Na₂SO₄ pueden ser en general más estables que el CaSO₄, siendo deseable que todos los sulfuros estén combinados con álcalis lo máximo posible. Esto puede ser investigado observando la relación álcali-sulfato.

6.2.6 Relación molecular álcali-sulfato

La concentración de sulfuro y álcali puede incrementarse a tal punto que afecta la operación del horno causando pegaduras.

Individualmente los álcalis son más dañinos a la operación del horno, que sus sulfatos. Por ejemplo, el K₂SO₄ tiene una alta temperatura de evaporación, entra al clínter sin evaporarse. Lo mismo aplica a aproximadamente la mitad del Na₂SO₄.

$$\left(\frac{SO_3}{Alk} \right)_{optimo} = \frac{\frac{SO_3}{80}}{\frac{K_2O}{94} + 0.5 * \frac{Na_2O}{62}} \approx 1.1$$

Tabla No. II Relación Molar Alcalis-azufre

El sulfuro y los álcalis son el total de entrada. Si la relación excede 1.1 se tiene una cantidad de sulfuro en exceso, que no se puede “cubrir” por los álcalis en el horno y este exceso formara CaSO₄.

La cantidad en exceso de sulfuro (E.S) es expresada en gramos de SO₃ por 100 Kg. de clínker y es calculado de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$E.S. = 1000 * SO_3 - 850 * K_2O - 650 * Na_2O \quad [gr SO_3 / 100 kg \text{ clínker}]$$

El límite de exceso en sulfuro está dado en el rango de 250-600g/100kg clínker. Sobre estos límites, el sulfuro empezará a dar problemas de cubrimiento en el precalentador.

El análisis referencial como finalidad encontrar la relación que guarda la evaporación del SO₃, con variables de proceso (tales como la TBZ, Temp. Mat etapal, entre otras) así como encontrar las acciones que nos rompan los ciclos de concentración de SO₃ en la Etapa I.

6.2.7 Volatilidad de los elementos circulantes:

Elemento Volátil	Fórmula
Azufre	S
Cloro	Cl
Potasio	K
Sodio	Na
Tabla No III Elementos volátiles	

6.2.8 El elemento cloro:

El cloro ingresa con las materias primas y los combustibles (incluyendo los combustibles alternativos).

El cloro se combina con los álcalis para formar cloruros alcalinos.

Los cloruros volatilizan en las zonas de calcinación y transición

Las medidas en contra de los ciclos de cloro son limitadas debido a su alta volatilidad.

6.2.9 *Los elementos alcalinos:*

Los álcalis, son los óxidos de sodio (Na_2O) y de potasio (K_2O) que afectan la calidad del cemento y plantean considerables problemas operativos.

Los álcalis ingresan al sistema del horno a través de la arcilla.

Debido a la baja volatilidad del sodio, este contribuye muy poco al ciclo interno dentro del sistema del horno.

Los álcalis se combinan con el cloro para formar cloruros alcalinos.

En la entrada del horno y en la zona de calcinación, se combinan con el dióxido de azufre (SO_2) para formar sulfatos alcalinos estables.

6.2.10 Ciclos de elementos circulantes:

Puntos de fusión			
Elemento volátil	Compuesto	Temperatura [°C]	comentarios
Cloruros	NaCl	801	
	KCl	776	
	CaCl ₂	772	
Sulfatos	Na ₂ SO ₄	884	
	K ₂ SO ₄	1069	
	CaSO ₄	1280	Descompuesto

Tabla No IV Puntos de fusión elementos volátiles

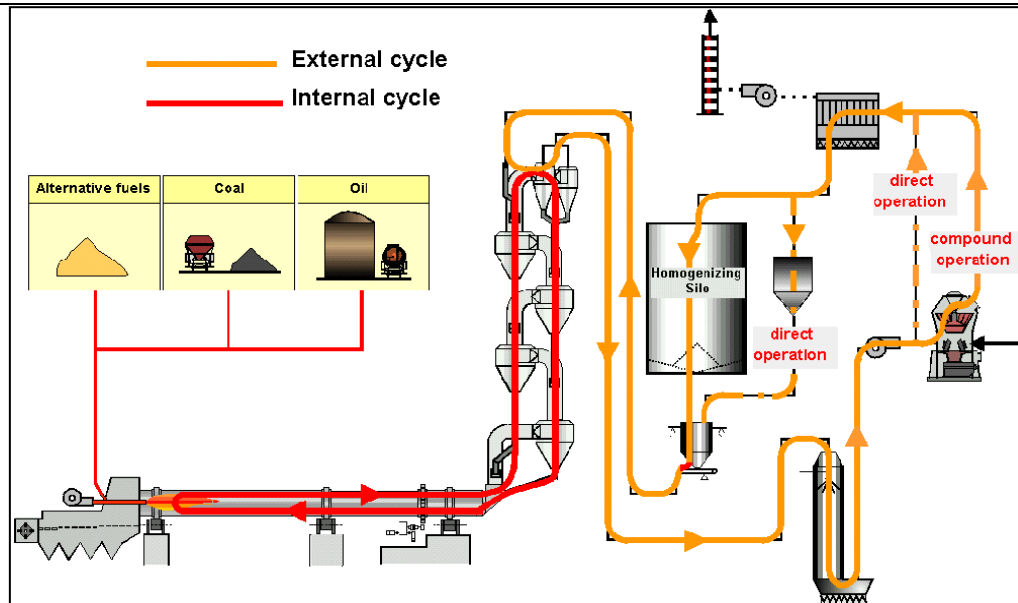


Figura No. 4 Ciclo de elementos circulantes

Ciclo Interno: los elementos circulantes ingresan con la harina de crudo y/o el combustible y a altas temperaturas se vaporizan. Parte del vapor sale del sistema mientras que la otra parte se condensa en

ambientes más fríos. Algunos de los elementos condensados vuelven a ingresar a las zonas de altas temperaturas y se vaporizan nuevamente estableciendo un ciclo.

Ciclo Externo: una pequeña parte de los elementos circulantes abandonan el sistema condensados en el polvo de salida, dentro de la corriente de gas. El polvo es separado en una unidad de desempolvado y es introducido nuevamente dentro del sistema del horno a través del sistema de alimentación.

Definiciones:

La volatilidad es el grado o índice en el cual un elemento químico se vaporizará bajo ciertas condiciones de temperatura y presión.

La volatilidad aumenta con altas temperaturas.

La insuficiencia de oxígeno aumenta la volatilidad del azufre.

Volatilidad relativa en %, en proporción entre un balance total externo e interno para un elemento dado.

6.2.11 Volatilidad de los elementos circulantes:

Los cloruros alcalinos son completamente volatilizados a las temperaturas de la zona de quemado.

Los sulfatos alcalinos son compuestos estables, con volatilidades de 0.3 o 0.4, lo que les permite abandonar el sistema con el clinker.

El exceso de azufre sobre los álcalis produce sulfatos de calcio con altas volatilidades de 0.90 a 1.0.

Ecuación de volatilidad total:

$$\epsilon = 1 - [C_{ck}/C_{HM}]$$

ϵ Factor de volatilidad total
 $[C_{ck}]$ = concentración del elemento en el clinker producido
 $[C_{HM}]$ = concentración del elemento en la harina caliente

La volatilidad total de los elementos o compuestos indican que proporción es volatilizada en el horno.

“Se estableció el factor de volatilidad del SO₃ como una forma de medición de los ciclos de volatilidad y su relación con la problemática”

Estabilidad de los compuestos que forma el sistema Cl, K₂O, Na₂O y SO₃ en función del factor de evaporación.

	KCl	Cl libre K ₂ O	Na ₂ O	Cl	Alcali SO ₃	SO ₃ en exceso
Factor de evaporación	0.990-0.996	0.10-0.40	0.10-0.25	0.990-0.996	0.30-0.90	0.75
Tabla No V Estabilidad de compuestos minoritarios en función evaporación						

6.2.12 Volatilidad del cloro

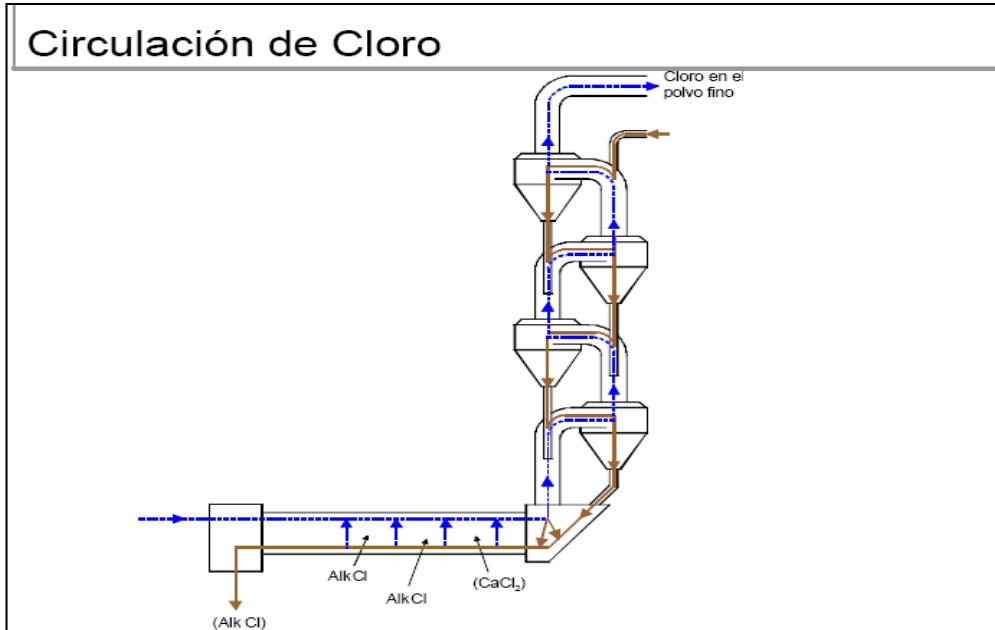


Figura No. 5 Volatilidad de Cloro

6.2.13 Volatilidad del azufre:

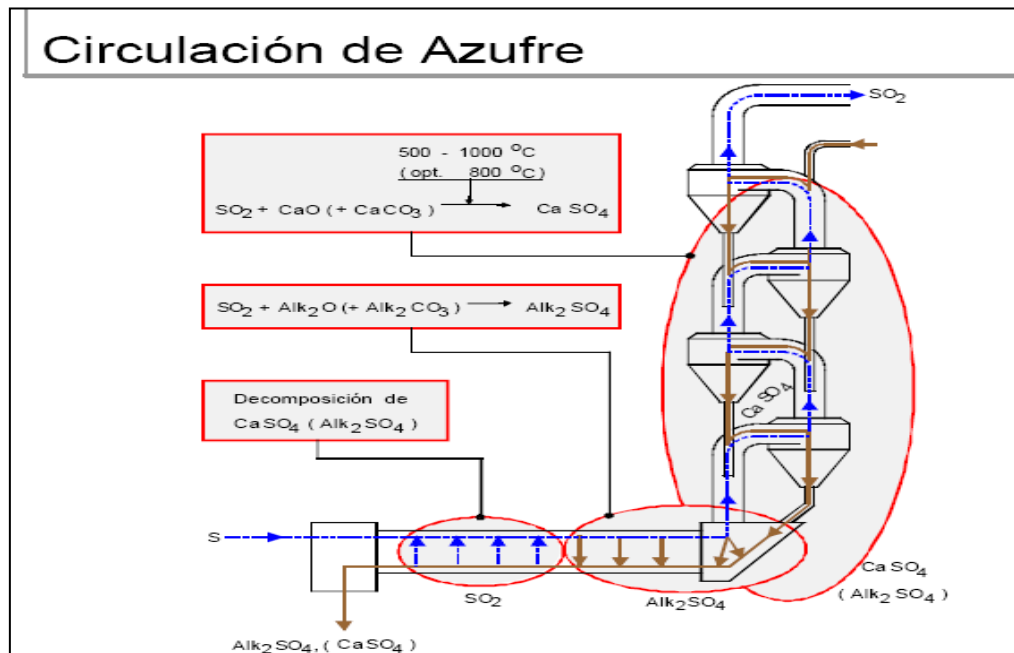


Figura No. 6 Circulación de Azufre

6.2.14 *Análisis de problemas de circulación.*

6.2.14.1 *Advertencia de resultados operativos.*

Reacción normal	Advertencia resultados operativos
Mantener la misma producción	Menos aire de exceso
	Formación de monóxido de carbono
	Aumento del ciclo de azufre
	Aumento de incrustaciones
Tabla No. VI Advertencia de resultados operativos	

6.2.14.2 *Advertencia ciclo cloro y azufre:*

Ciclo de Cloro	Advertencia de ciclos
Impide la combustión completa	Aumenta ciclo de azufre
	Exigencia de aire en exceso
Ciclo de azufre	Aumenta la formación de polvo
Tabla No. VII Advertencia de resultados Ciclos de Cloro y Azufre	

6.2.14.3 *Problemas de operación del horno*

Problemas de operación del horno	Resultado
Crítico para el proceso	Paros frecuentes
	Reducción de producción máxima
	Consumo térmico más alto
	Vida reducida del refractario
Tabla No. VIII Advertencia de problemas en la operación del horno	

6.2.14.4 *Análisis de problemas de circulación*

Análisis de Problemas de circulación	
Actividad	Acción
Análisis sistemático de la harina caliente	Comparación con los límites
Balance de masa [Entradas y Salidas]	Comparación con entradas típicas [materias primas, combustibles]
Relación molar de álcali azufre	Volatilidad de azufre [Evaporación >0.7]
Posición/análisis de costra	Medidas contra formación de costra
Tabla No. IX Acciones de problemas de Circulación en el horno	

6.2.14.5 *Entradas típicas de elementos circulantes*

Entradas típicas de elementos circulantes		
Cl	<0.02%	Caso normal, ningún problema
	>0.05%	Graves problemas de taponamiento, en función de ciclo de azufre
SO ₃	<0.05%	Caso normal, ningún problema
	>1.25%	Graves problemas de taponamiento, en función del grado de sulfatización
K ₂ O	<1.0%	Caso normal, ningún problema
	>1.5%	Problemas con incrustaciones
Na ₂ O	→	ningún problema
Tabla No. X Entradas de elementos circulantes [entradas totales a base de clinker]		

6.2.14.6 Limpiezas inteligentes:

Ciclos de Elementos Circulantes

Limpieza "Inteligente"

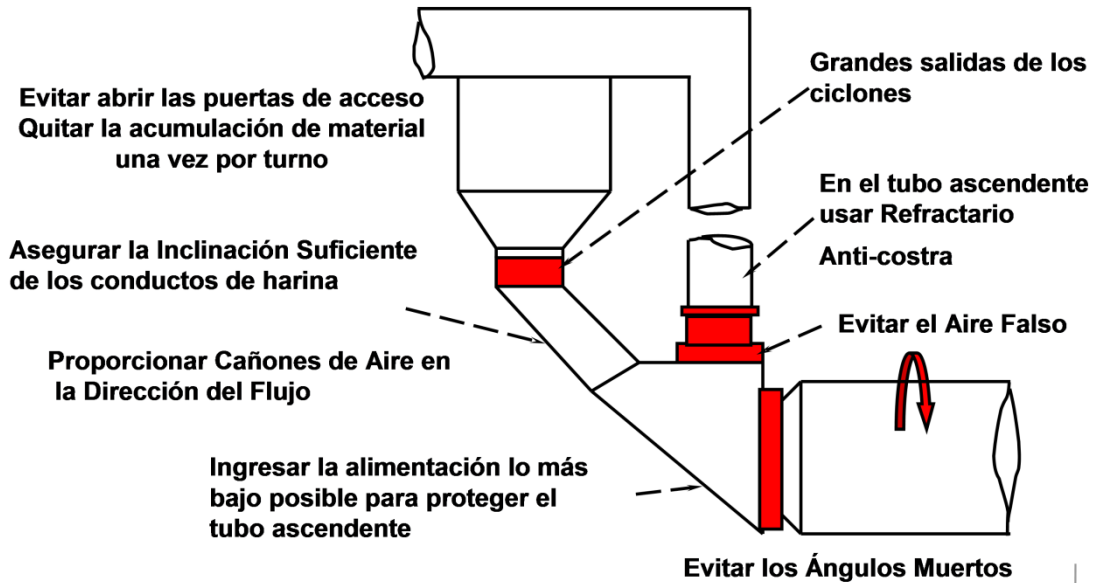


Figura No. 7 Limpiezas inteligentes

6.2.14.7 El elemento azufre

Información general	El azufre se introduce al sistema del horno a través de los combustibles tales como carbón, petcoke, fuel oil y combustibles alternos.
	El azufre ingresa al sistema del horno con las materias primas en forma de [sulfato anhídrido $\text{Ca}(\text{SO}_4)$], o bien como sulfuro [pirita (FeS)].
	El azufre se volatiliza a las temperaturas de la zona de quemado.
	Alta absorción de SO_2 alrededor de 800 a 900°C.
	El azufre se combina con los álcalis y forma un sulfato alcalino estable, que abandona el horno en el clinker producido.
	El exceso de azufre sobre los álcalis se combinan con calcio para formar el compuesto volátil de sulfato de calcio
Volatilidad del azufre [Las condiciones de operación puede aumentar la volatilidad del azufre]	Temperatura máxima de la zona de clinkerización [Crudo difícil de quemar y cales libres bajas].
	Tiempo de residencia en el horno [largas exposiciones a temperatura de quemado].
	Condiciones reductores [Bajo contenido de O_2].
Entradas de Azufre	La entrada normal de azufre con la alimentación de crudo y los combustibles $<0.05\% \text{SO}_3$, no presenta problemas en los sistemas de horno.
	Entradas totales de SO_3 de $> 1.25\%$ presenta acumulación de material pesado dentro del sistema del horno

Tabla No. XI El elemento Azufre [Características]

6.2.14.8 Límites de control del elemento azufre

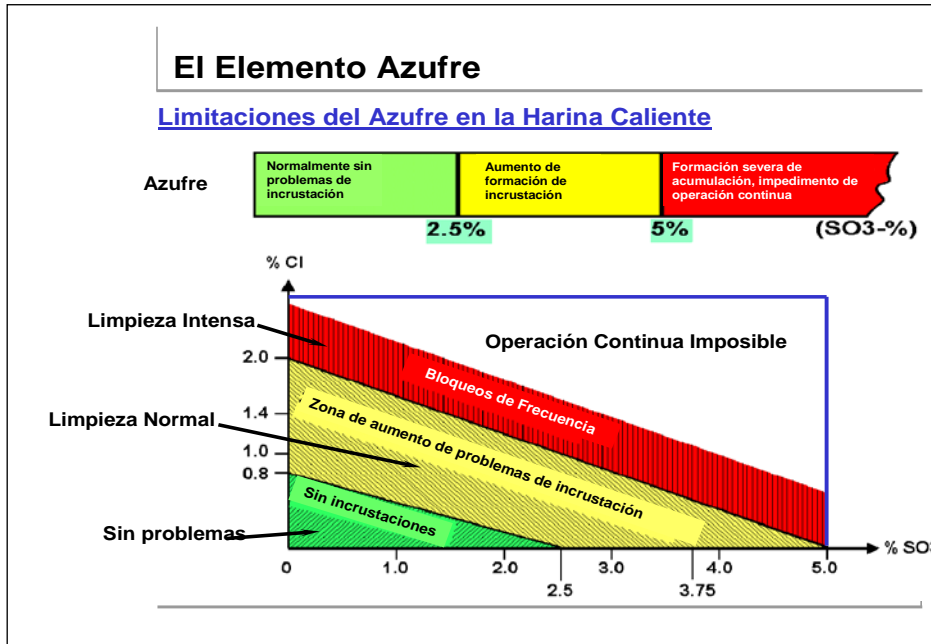
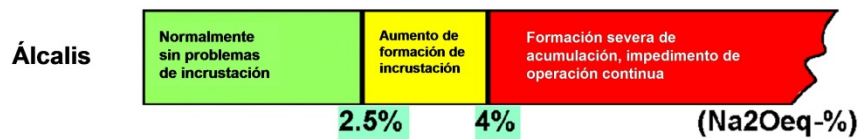


Figura No. 8 El elemento Azufre [Límites de Control]

6.2.14.9 Límites de control de elementos alcalinos

Los Elementos Alcalinos

Limitaciones de Álcalis en la Harina Caliente



Entradas de Álcalis

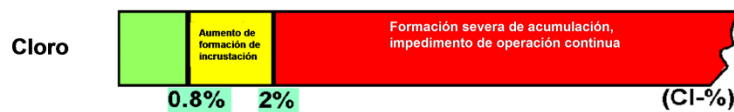
- La entrada normal total de Álcalis (Óxido de Potasio, K₂O) <1.0% no presenta problemas en el sistema del horno.
- La entrada total de Álcalis de K₂O >1.5% (también dependiendo de la relación Álcali/Azufre) presenta problemas con la acumulación de material dentro del sistema del horno.

Figura No. 9 Los elementos Alcalinos [Límites de Control]

6.2.14.10 Límites de control del elemento cloro

El Elemento Cloro

Limitaciones de Cloro de Harina Caliente



Inputs de Cloro

- La entrada de Cloro de 0.02 – 0.03% sobre base clinker, no presenta problemas dentro del sistema del horno.
- La entrada de Cloro de >0.05% presenta acumulación de material pesado dentro del sistema del horno.

Figura No. 10 El elemento Cloro [Límites de Control]

6.2.14.11 Reacciones de formación y absorción de Azufre

Parte de la Planta	SO ₂ [Formación]	SO ₂ [Absorción]
Molino de Crudo & Colector principal		$\text{CaCO}_3 + \text{SO}_2 \rightarrow \text{CaSO}_3 + \text{CO}_2$
Zona de Precalentador	$\text{Sulphides} + \text{O}_2 \rightarrow \text{Oxides} + \text{SO}_2$ $\text{Organic S} + \text{O}_2 \rightarrow \text{SO}_2$	$\text{CaCO}_3 + \text{SO}_2 \rightarrow \text{CaSO}_3 + \text{CO}_2$
Zona de Calcinación	$\text{Fuel S} + \text{O}_2 \rightarrow \text{SO}_2$ $\text{CaSO}_4 + \text{C} \rightarrow \text{CO} + \text{SO}_2$	$\text{CaO} + \text{SO}_2 \rightarrow \text{CaSO}_3$ $\text{CaSO}_3 + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow \text{CaSO}_4$
Zona de Clinkerización	$\text{Fuel S} + \text{O}_2 \rightarrow \text{SO}_2$ $\text{Sulphates} \rightarrow \text{Oxides} + \text{SO}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2$	$\text{Na}_2\text{O} + \text{SO}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow \text{Na}_2\text{SO}_4$ $\text{K}_2\text{O} + \text{SO}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow \text{K}_2\text{SO}_4$ $\text{CaO} + \text{SO}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow \text{CaSO}_4$
Tabla XII Reacciones de formación y absorción de azufre		

La Tabla XII, nos muestra las reacciones de formación y absorción del azufre de acuerdo a lo siguiente:

REACCION DE FORMACION:

El azufre proviene de las materias primas y el combustible, es introducido en el sistema del horno, en forma de sulfatos, sulfuros o compuestos orgánicos de azufre. En la zona del precalentador, se oxidan para formar oxidos y SO₂. En la zona de calcinación, el azufre

contenido en el combustible, se oxida y produce mas cantidad de SO_2 , a si mismo, cuando existe un desbalanceo en la relación Alkali/sulfato, menor a 0.8, la tendencia es formar sulfato de calcio anhidro CaSO_4 , y al existir condiciones reductoras, se forma monóxido carbono, CO y SO_2 . En la zona de clinkerización, el azufre del combustible, sigue oxidandose y formando más SO_2 , asi mismo, los sulfatos formados se descomponen y forman oxidos más SO_2 .

REACCIONES DE ABSORCION:

En la sección del molino de crudo y el colector principal del horno, la harina cruda contiene, carbonato de calcio, CaCO_3 , absorbe SO_2 y forma sulfito de calcio, CaSO_3 más dióxido de carbono, CO_2 . El mismo fenómeno ocurre en la zona del precalentador. En la zona de calcinación, una vez realizada la reacción de descarbonatación, el óxido de calcio, CaO , reacciona con el SO_2 , para continuar formando sulfito de calcio, CaSO_3 , este compuesto reacciona en presencia de oxígeno para formar el sulfato de calcio anhidro, CaSO_4 . La zona de clinkerización, los alcalis totales, reaccionan con el SO_2 formado en esa zona y forman sales de sulfato de alcali, Na_2SO_4 y K_2SO_4 , también se lleva a cabo la reacción de el óxido de calcio con el SO_2 , para continuar formando el CaSO_4 .

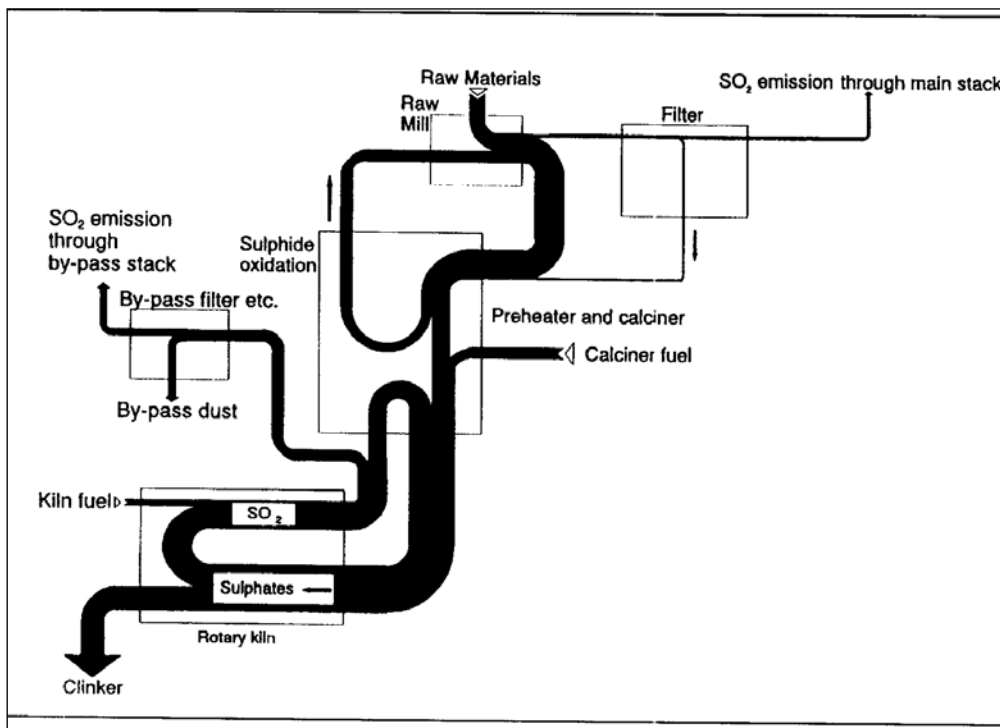


Figura 11 Compuestos de Circulación de azufre en el sistema de Calcinación

La Figura 11, nos muestra los compuestos de circulación de azufre en el sistema de calcinación. En un sistema horno con calcinador del 25 al 90%, del azufre total, se evapora, no solo la evaporación de los sulfatos de alcali, Na_2SO_4 y K_2SO_4 , sino también la descomposición del CaSO_4 .

En la sección correspondiente al horno, se tiene el SO_2 formado a partir del combustible y en la zona de clinkerización, contiene los sulfatos.

En la sección del precalentador y el calcinador, se tiene SO_2 formado a partir de los combustibles, así como la descomposición originada por las reacciones que se llevan a cabo en esa zona. Como se menciona en la Tabla XII, se llevan a cabo las reacciones de formación y absorción de los compuestos de azufre.

En hornos que contienen Bypass, generalmente se sitúan en la región de la cámara de humos, con la finalidad de eliminar los compuestos

volátiles, a través de un sistema de absorción y finalmente la eliminación del SO₂ a través de una chimenea hacia la atmósfera.

Finalmente, la sección del Molino de crudo y colector de alta temperatura, de acuerdo como se explicó en la tabla XII.

6.2.15 DISEÑO DE EXPERIMENTOS 2^k

El diseño factorial dos niveles, es un método basado estadísticamente e involucra ajustes simultáneos de factores en solo dos niveles [Alto y Bajo].

El modelo factorial de dos niveles, es más eficiente que el modelo un factor a la vez.

La prueba a solo dos niveles, es una restricción que minimiza el número de experimentos.

En el caso del modelo 2^k, [Dos niveles [alto y bajo] y tres factores], nos arroja ocho corridas donde se combinan los tres factores con los dos niveles, dando un diseño completo.

Podemos concluir que en el modelo 2^k, obtendremos como resultado lo siguiente:

- i Tres efectos principales, uno para cada factor. [A], [B] y [C].
- ii Tres interacciones, entre dos factores, [A*B], [B*C] y [B*C].
- iii una interacción, entre tres factores, [A*B*C].
- iv El valor promedio de todo el sistema.
- v En el modelo podemos mencionar que en cada columna tendremos, cuatro niveles altos y cuatro bajos.

6.2.15.1 ANTECEDENTES: Existe la preocupación, por parte de la gerencia de la Unidad II, minimizar, eliminar o controlar el efecto causado por, la presencia de SO₃ asociado con otros compuestos minoritarios dando como resultado inestabilidad en la operación del horno, cuando se produce clinker tipo 2. La problemática se puede resumir en: pegaduras en el sistema Calcinador-horno; Exceso de CO, en el sistema; Clinker muy polvoso; Exceso de SO₃; Pérdida de producción.

- 6.2.15.2 *JUSTIFICACION:* El impacto de estos problemas o situaciones no deseadas sobre la eficiencia del horno, se encamina directamente sobre los costos de producción del clinker tipo 2.
- 6.2.15.3 *HIPOTESIS:* Es probable que la problemática de baja eficiencia del sistema calcinador-horno, se deba a cambios en la mineralogía de las materias primas, cambios químicos, físicos o mineralógicos, no controlados de los materiales en el proceso, operación, así como de los combustibles alternos.
- 6.2.15.4 *OBJETIVO GENERAL:* Analizar y evaluar la problemática de la baja eficiencia del sistema Calcinador-horno, bajo las nuevas condiciones químicas de los combustibles alternos, mezcla cruda, materiales en proceso y clinker.
- 6.2.15.5 *METODOLOGIA:* Se propone utilizar un Diseño de Experimentos 2^k , apoyados en el modelo, diseño factorial dos niveles, tres factores, de acuerdo a lo siguiente:

Orden aleatorio	Factores			Interacciones			
	A	B	C	AXB	AXC	BXC	AXBXC
6	-	-	-	+	+	+	-
8	-	-	+	+	-	-	+
1	-	+	-	-	+	-	+
4	-	+	+	-	-	+	-
2	+	-	-	-	-	+	+
5	+	-	+	-	+	-	-
3	+	+	-	+	-	-	-
7	+	+	+	+	+	+	+

Tabla No. XIII Modelo diseño factorial 2^k

6.2.15.6 Alternativas para modelos diseño factorial

Se propone como alternativas los siguientes modelos:

Factor	Bajo	Alto	Factor	Bajo	Alto	Factor	Bajo	Alto
Eva	0.7	1	Eva	0.7	1	Eva	0.7	1
R ₉₀	18	20	R ₉₀	18	20	R ₉₀	18	20
DesCO ₂	86	92	T _{Calcinador}	860	880	TBZ	1300	1400
Alternativa No 1			Alternativa No 2			Alternativa No 3		
Tabla No. XIV Alternativas para Modelos diseño factorial 2 ^k								

6.2.15.7 Corridas completas para modelo DF 2^k

Corridas completas	Factores								
	Eva	R ₉₀	DesCO ₂	Eva	R ₉₀	T _{Calcinador}	Eva	R ₉₀	TBZ
1	0.7	18	92	0.7	18	860	0.7	18	1300
2	1	18	92	1	18	860	1	18	1300
3	0.7	20	92	0.7	20	860	0.7	20	1300
4	1	20	92	1	20	860	1	20	1300
5	0.7	18	95	0.7	18	880	0.7	18	1450
6	1	18	95	1	18	880	1	18	1450
7	0.7	20	95	0.7	20	880	0.7	20	1450
8	1	20	95	1	20	880	1	20	1450
	Alternativa No 1			Alternativa No 2			Alternativa No 3		
Tabla No. XV Corridas completas para Modelos diseño factorial 2 ^k									

6.3 Química del proceso de calcinación: La cinética de formación de clínker puede dividirse en tres etapas, según los fenómenos químicos que ocurren durante el proceso cinético global:

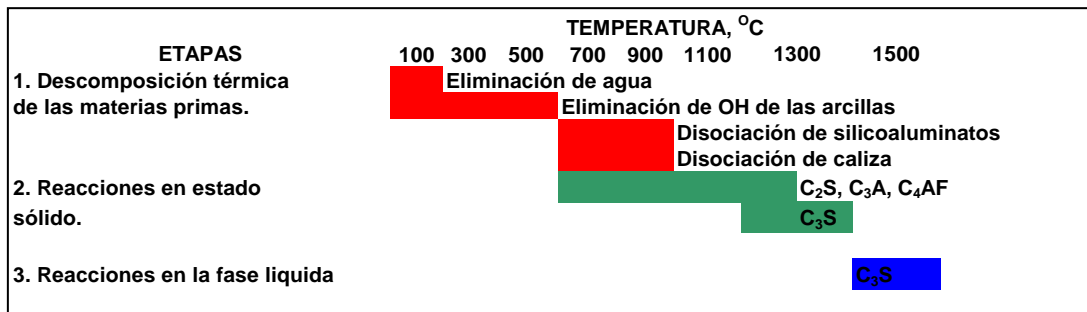


Figura 12 Cinética de la formación de clínker

VII. RESULTADOS Y DISCUSION

En este capítulo se presenta en detalle el análisis de la información recabada respecto a los resultados y discusión que se obtuvieron.

Situación actual:

La problemática de la baja productividad del sistema de clinkerización puede referirse a varias fechas desde noviembre del 2005 hasta los últimos eventos ocurridos en las campañas de producción de clínker tipo 2.

Síntomas que presentaba el sistema de clinkerización bajo condiciones problemática eran:

1. Bajas tasas de producción de clínker (Ton/hr).
2. Variación de la calidad del clínker.
3. Operación inestable por clínker polvoso.
4. Incremento en las Kcal/KgCK.
5. Incrustaciones y pegaduras en el precalentador.
6. Incremento de los Kwh/ton Cto.

7.1 Planteamiento del problema desde el inicio se dividió en las siguientes partes:

Variación en la composición química de las materias primas.

Incremento de la concentración de compuestos volátiles en el sistema.

Variación en las propiedades y composición química del carbón.

Problemas de combustión de los neumáticos usados.

Desajustes operativos.

1. La flama y su efecto sobre el proceso.
2. La problemática de la baja productividad del sistema de clinkerización es abordada desde dos aspectos relacionados con cambios fisicoquímicos de mezcla cruda y con la operación del proceso:
3. Incremento en el contenido de SO_3 en las materias primas locales (Caliza y Lutita) y por consecuencia variación en los cambios fisicoquímico de la mezcla cruda.
4. Problemas operativos.

La orientación del proyecto se dio en el sentido de encontrar las posibles causas de la baja productividad del sistema de clinkerización, asumiendo excesos de compuestos volátiles tales como el SO_3 , Na_2O , K_2O y Cl .

7.2 Análisis referencial del problema

Factor de Evaporación:

Definición de volatilidad total.

$$\epsilon = 1 - [C_{ck}/C_{HM}]$$

ϵ Factor de volatilidad total

C_{ck} Concentración de elementos circulantes en el clinker.

C_{HM} Concentración de elementos circulantes en la alimentación caliente.

El período de análisis fué del 30 de Mayo al 11 de Junio 2006.

Se va realizar el análisis de multivariantes, para evaluar, el análisis de la descarbonatación en la harina caliente de la Etapa I, mencionado en el capítulo 2.

Plan colección de datos:

Establecer variables de calidad

Capturar variables de calidad

Elaborar análisis estadística descriptiva

Elaborar análisis multivariantes

Elaborar análisis de medias

Elaborar análisis de varianza una vía

Elaborar análisis de regresión simple y/o múltiple

Varianza generalizada aplicada a variables significativas

FASE MEDICION:				
PLAN COLECCION DE DATOS:		ANALISIS BAJAS RESISTENCIAS CEMENTO CPC30-R		
BASE DE DATOS:		DEFINICIONES OPERATIVAS Y PROCEDIMIENTOS		
QUE?	TIPO MEDICION	COMO SE MIDIERON	CONDICIONES PARA HISTORICOS	COMO? DONDE?
VARIABLES de calidad del producto	Datos continuos	Reporte mensual de calidad (Pruebas físicas)	Reportes diarios de pruebas físicas	Sistema reporte Pruebas Físicas
Asegurar consistencia: Asegurar confiabilidad:		Plan colección de datos: 1. Establecer variables de calidad 2. Tener reporte pruebas físicas disponible 3. Capturar variables de calidad Plan de medición de datos: 1. Elaborar análisis estadística descriptiva 2. Elaborar análisis multivariantes 3. Elaborar análisis de medias 4. Elaborar análisis de varianza una vía 5. Elaborar análisis de regresión simple y/o múltiple		

Tabla No XVI Fase de medición

7.3 Resultados obtenidos:

Del análisis multivariable, nos arrojo el siguiente resultado:

Para la Evaporación del SO_3 , las variables más significativas, fueron SO_3 , SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 .

Para el SiO_2 la variable más significativa, fue MS

Para el Al_2O_3 , las variables más significativas, fueron: MA, CaO, ZCK.

Para EL CaO, las variable más significativas, fueron, MgO, FSC.

Para el K_2O , las variables más significativas, fueron: AT, Na_2O , Etapa-1, Descarbonatación.

Estadística Descriptiva Pérdida de producción Ck tipo 2				
Variable	Media	SE Mean	Mínimo	Máximo
Eva	0.6869	0.0193	0.26	0.9
Ton/hr	173.84	0.954	160	186.2
SiO_2	20.21	0.101	16.63	21.16
Al_2O_3	5.102	0.0179	4.73	5.78
Fe_2O_3	3.0525	0.0213	2.57	3.4
CaO	62.74	0.239	52.42	66.81
MgO	1.7471	0.019	1.26	2.33
SO_3	2.30	0.108	0.96	4.25
K_2O	1.7058	0.0355	0.57	2.31
Na_2O	0.2078	0.00391	0.11	0.28
FSC	97.21	0.514	91.42	116.6
MS	2.4788	0.0137	2.12	2.77
MA	1.6764	0.0143	1.53	2.22
AT	1.33	0.0249	0.53	1.77
Desc	93.51	0.335	86	97.78
Temp Etapa1	846.42	1.32	827	888
ZCk	1310	7.55	1118	1475

Tabla No XVII Estadística descriptiva pérdida de producción Ck Tipo 2

La Tabla No XVII, nos muestra la estadística descriptiva pérdida de producción clinker tipo 2, de las variables más significativas, de proceso y de calidad, mostrando los valores medios, máximos, mínimos, así como su desviación.

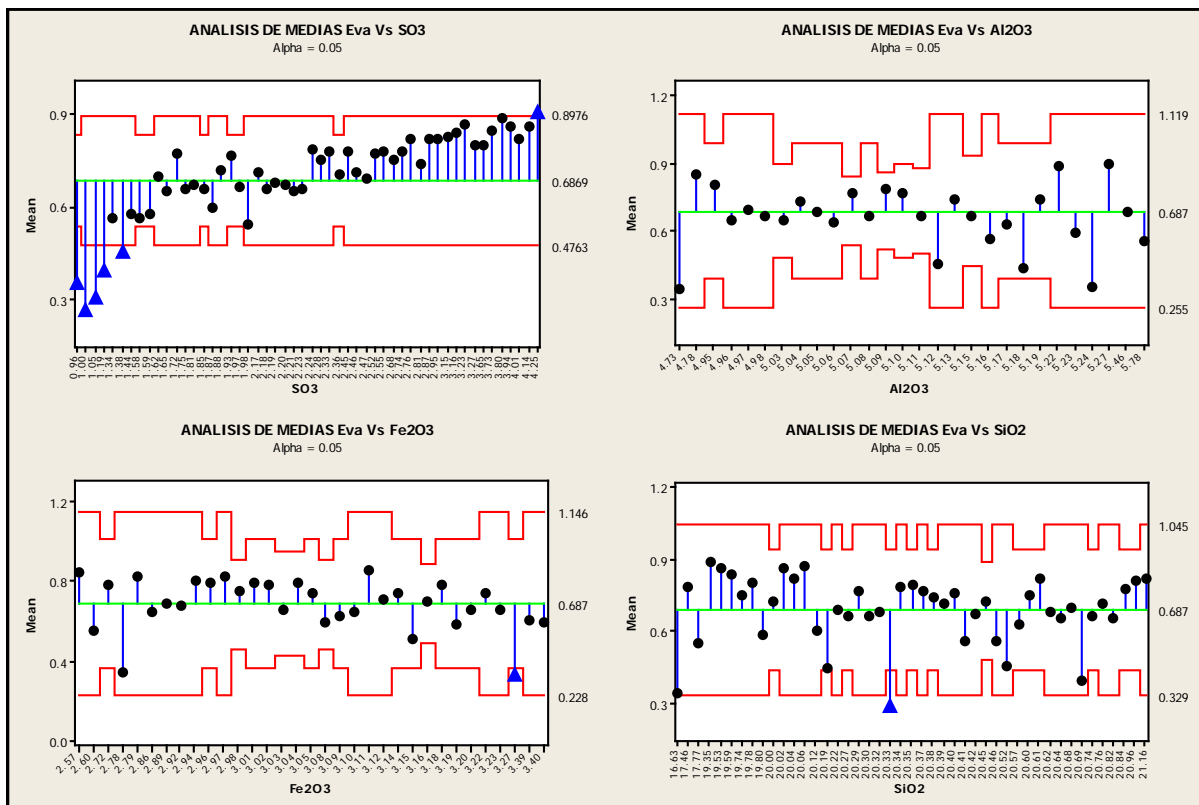


Figura No 13 Análisis de medias EVA Vs [SO₃, Al₂O₃, Fe₂O₃, SiO₂]

El ANOM, análisis de medias por sus siglas en inglés, es un procedimiento para determinar si los factores individuales, son diferentes del valor promedio de todas las observaciones, en el caso de la figura No 13, de lo más significativo, se evaluó, la evaporación de SO₃ contra el SO₃, ver sección 3.7.2 y de acuerdo a los parámetros de control, el valor promedio de Evaporación de azufre

fué de 0.687, valores por encima de ese valor, nos indican que el azufre, se esta concentrando en el sistema, provocando un desbalanceo en la relación alcali-sulfato, y creando inestabilidad en la operación

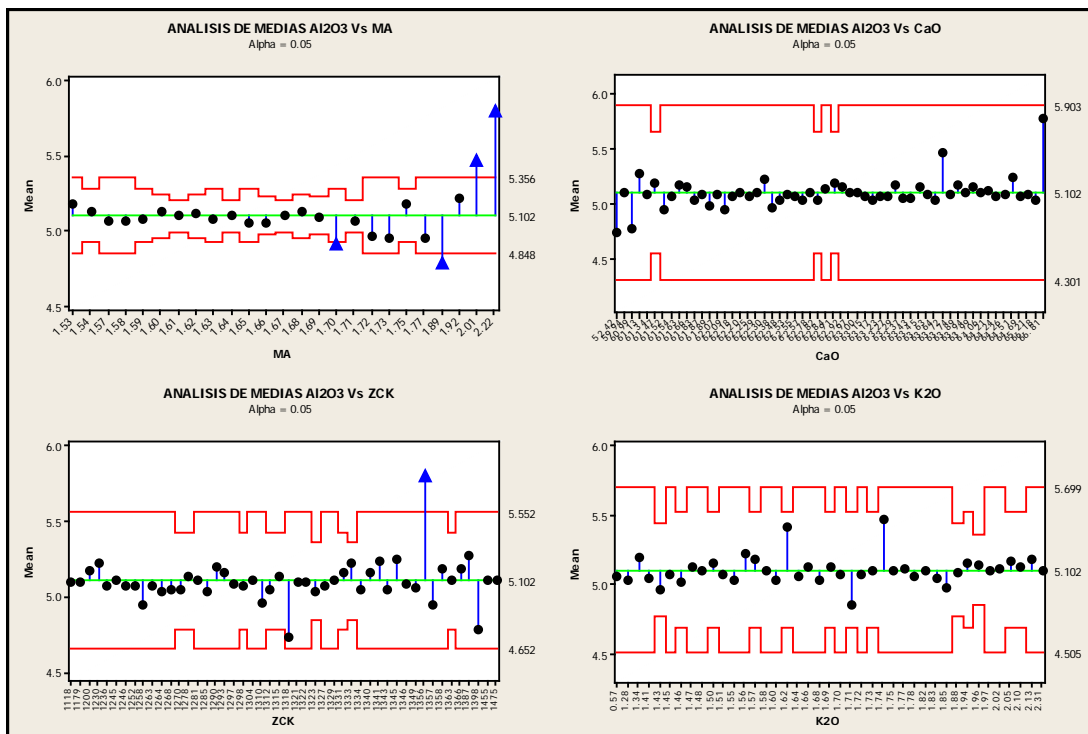


Figura No 14 Análisis de medias Al_2O_3 Vs [MA,CaO,Zck, K_2O]

El ANOM, de la figura No 14, se evaluó el contenido de Al_2O_3 Contra Módulo de Alúmina, [MA], óxido de calcio, [CaO], Zck, o temperatura de zona[ZCK] y oxido de potasio [K_2O], donde se observaron valores diferentes en el caso del Al_2O_3 Vs MA.

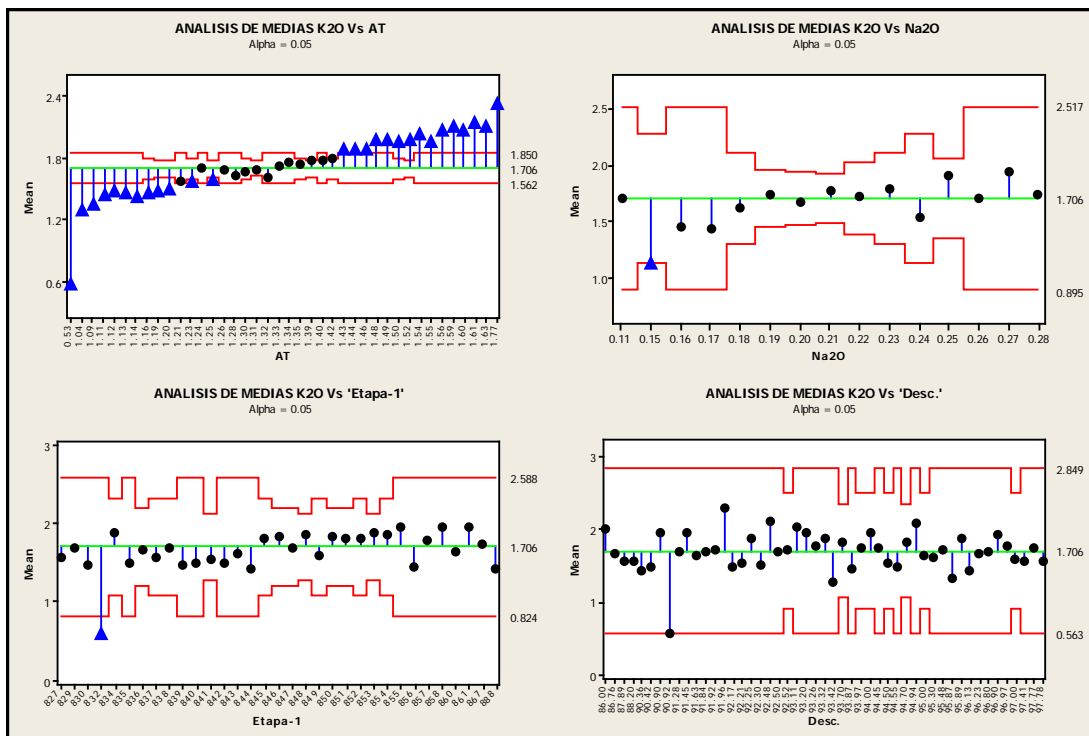


Figura No 15 Análisis de medias K₂O Vs [AT, Na₂O, Etapa I, DESC]

El ANOM, de la figura No 15, se evaluó el contenido de K₂O Contra Alcalis totales, [AT], óxido de sodio, [Na₂O], Etapa I y Descarbonatación [Desc], donde se observaron valores diferentes en el caso del K₂O Vs [AT]. El promedio de K₂O fué 1.76, para valores normales de 1.26 [AT], valores altos de alcalis de hasta 2.4%. esta determinación nos muestra que hay exceso de alcalis totales, presentando problemas de encostramiento en el sistema del precalentador.

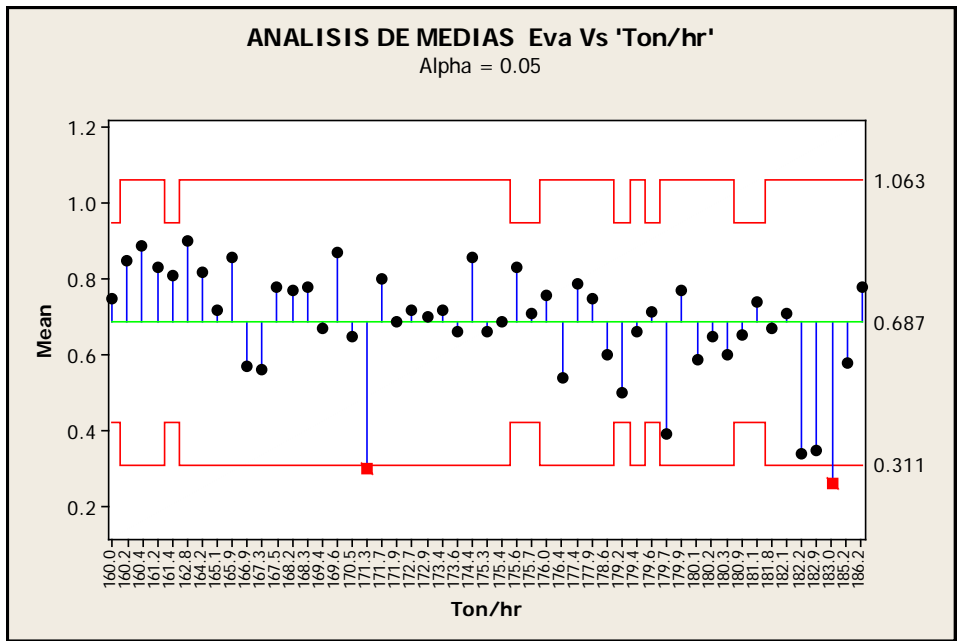


Figura No 16 Análisis de medias Eva Vs Producción de Ck Tipo 2

El ANOM, de la figura No 16, se evaluó la Evaporación de azufre, valores promedios de 0.687 [Contra la producción de clinker], donde se observaron valores diferentes en el caso de evaporación mayores que 0.7, presentando problemas de encostramiento en el sistema del precalentador, y por tanto pérdidas de producción de 20 tph.

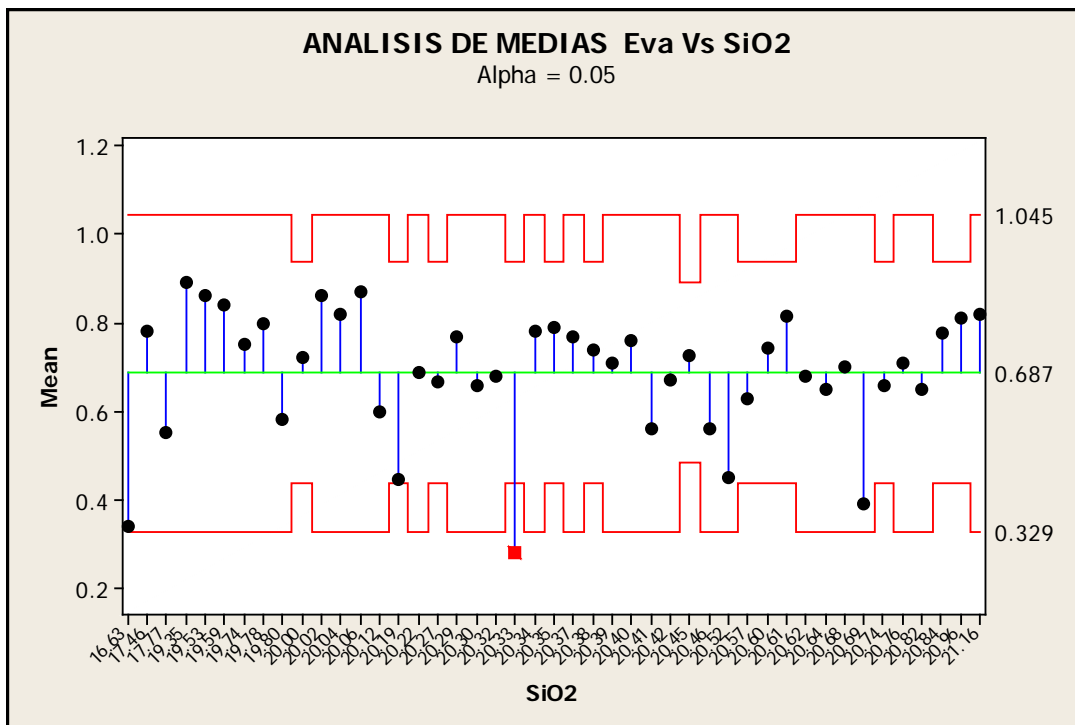


Figura No 17 Análisis de medias Eva Vs SiO₂

El ANOM, de la figura No 17, se evaluó la Evaporación de azufre, valores promedios de 0.687 Contra el contenido de SiO₂], donde se observa que no hay diferencia significativa.

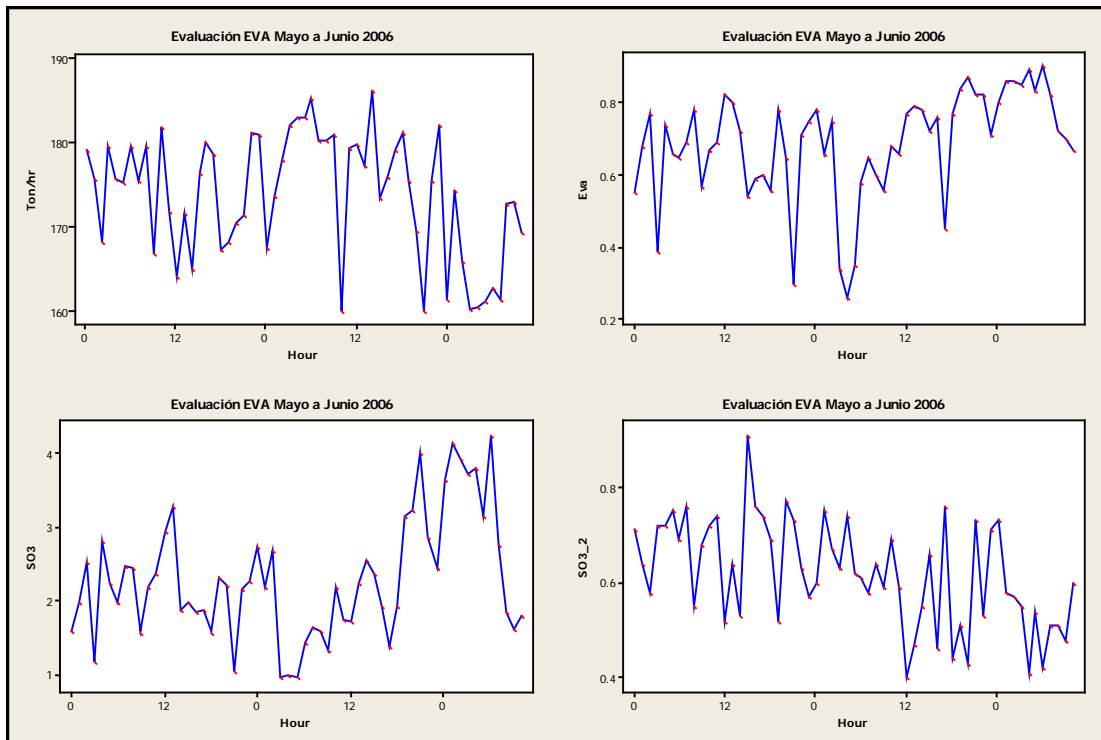


Figura No 18 Gráfica de tendencia TPH, Eva, SO₃ Vs tiempo

La figura No 18, muestra gráficas de tendencia, comparando Toneladas por hora de clinker producido, Evaporación de azufre, contenido de azufre en la Etapa I, así como el contenido de azufre en el clinker. Se tiene como resultado, cuando el contenido de Evaporación es mayor que el promedio, que es 0.687, la producción se ve reducida, como consecuencia del desbalanceo que se tiene en la relación alkali-sulfato, así mismo en el contenido de azufre en la etapa I, se observa un incremento, debido a la evaporación de azufre en el sistema, mientras que el azufre que sale del sistema, tiende a decrementarse, confirmando que hay un desequilibrio en la relación alkali-sulfato.

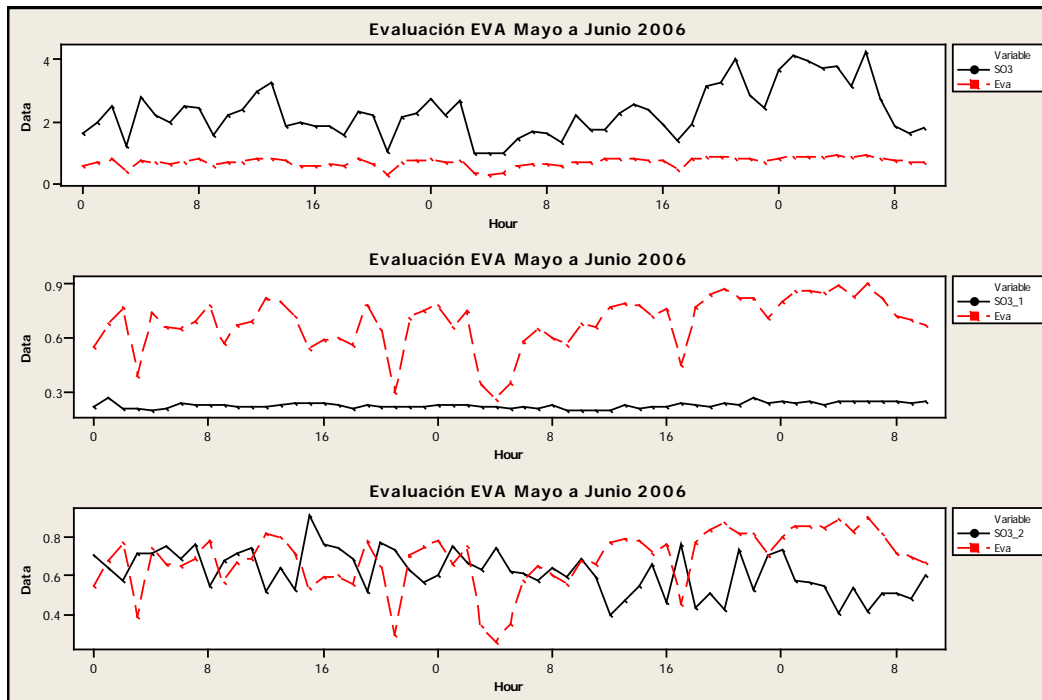


Figura No 19 Gráfica de tendencia Eva Vs SO_{3MCR} , SO_{3HM} , SO_{3CK}

La figura No 19, muestra gráficas de tendencia, comparando Evaporación de azufre, contenido de azufre entrando al sistema SO_{3MCR} , contenido de azufre en la Etapa I SO_{3HM} , así como el contenido de azufre en el clinker, SO_{3CK} .

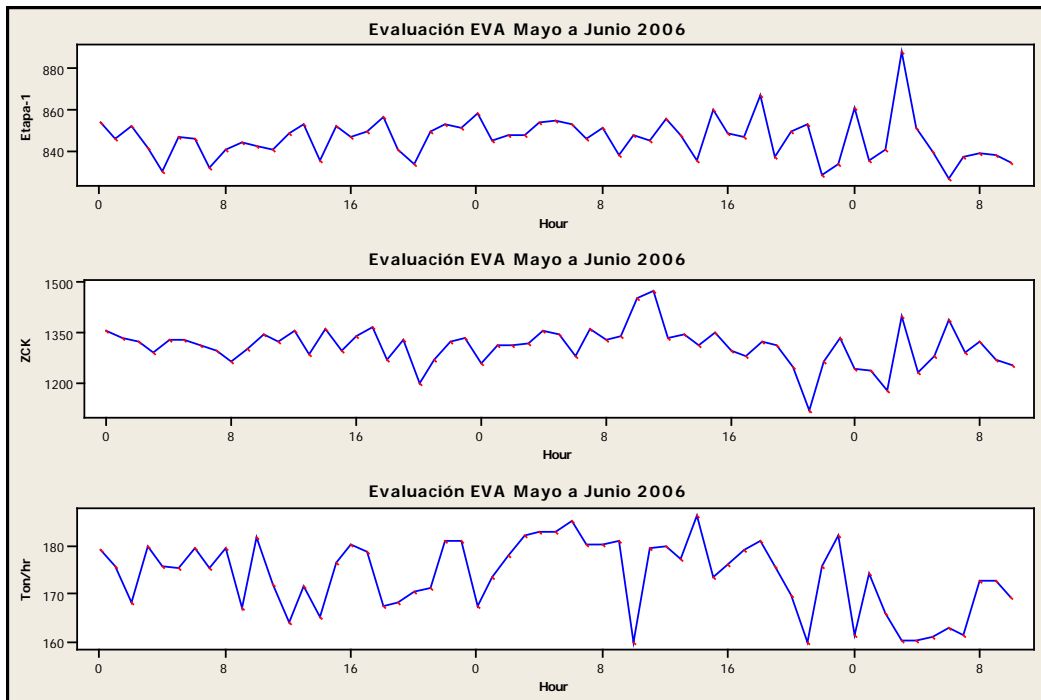


Figura No 20 Gráfica de tendencia Temp Etapa 1, TBZ, Alimentación harina cruda

La figura No 20, muestra gráficas de tendencia, comparando contenido de azufre en la Etapa I, Etapa-1, Temperatura zona de clinkerización, ZCK y Alimentación de harina cruda, Ton/hr. Un incremento en ZCK, aumenta la concentración de azufre en la etapa I, y al haber inestabilidad en el proceso como consecuencia del aumento de evaporación hay una disminución en la alimentación al horno y pérdida de producción.

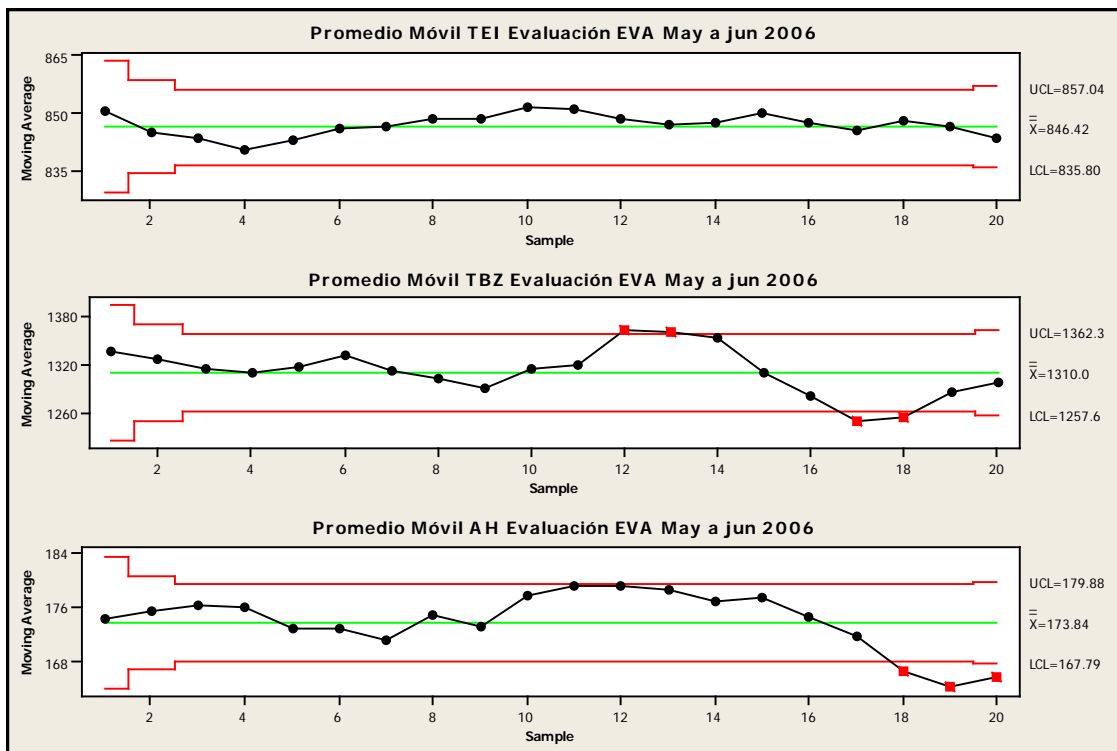


Figura No 21 Gráfica de promedios móviles Temp Etapa I, TBZ, Alimentación harina cruda

La figura No 21, muestra gráficas de promedios máviles, comparando Temperatura material salida Etapa I, T E1 Temperatura zona de clinkerización, TBZ y Alimentación de harina cruda, Ton/hr. En T E1, el valor promedio fue de 846°C y se observa grafica bajo control estadístico, La TBZ, con promedio de 1310 °C, se observa que al haber decremento hacia el limite inferior, hay un decremento en la alimentación, mostrando una relación inversa, sin embargo es importante, mantener condiciones de quemabilidad para evitar la evaporación.

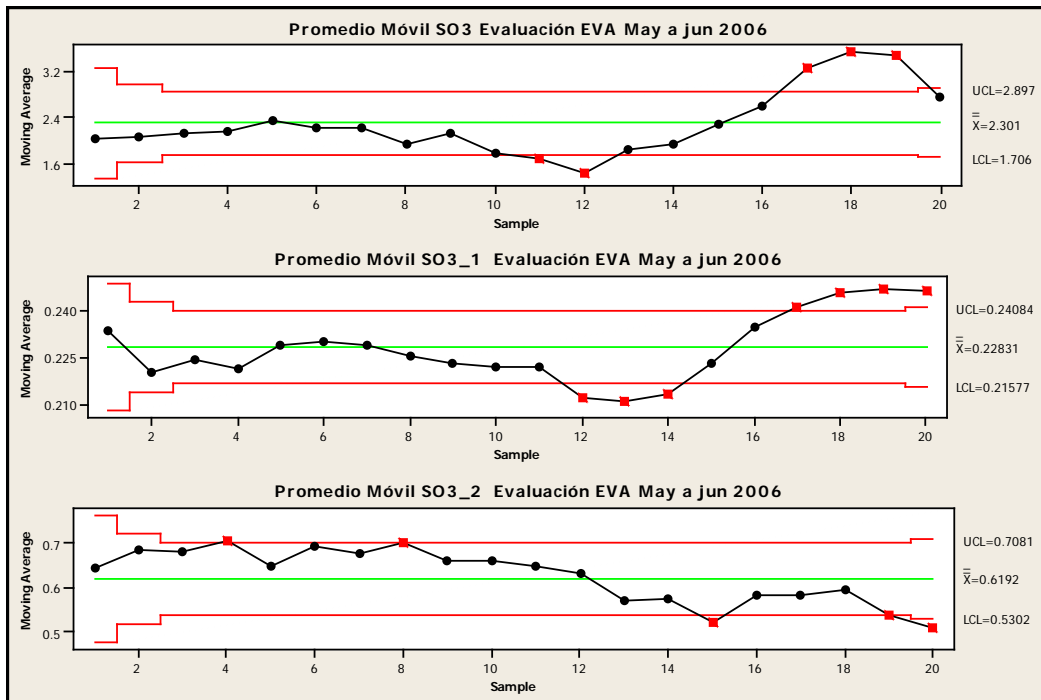


Figura No 22 Gráfica de promedios móviles SO₃, SO_{3_1}, SO_{3_2}

La figura No 22, muestra gráficas de promedios móviles, comparando contenido de azufre en el cono de la Etapa I, SO₃, contenido de azufre en la alimentación al horno, SO_{3_1}. contenido de azufre en el clinker, SO_{3_2}, el valor promedio de SO₃, fué de 2.301 y se observa incremento por encima del límite de control superior mayor a 2.89, lo que asevera que hay evaporación de SO₃ en el sistema, el valor promedio de SO_{3_1} es de 0.2283, se observan límites fuera de control, en ambos casos, abajo y arriba del límite, esto nos muestra descontrol en el azufre entrando al sistema , el valor promedio de SO_{3_2} es de 0.6192 y se observa una disminución de debajo del límite inferior a 0.5302, lo que confirma, que hay un desbalanceo de alkali-sulfato.

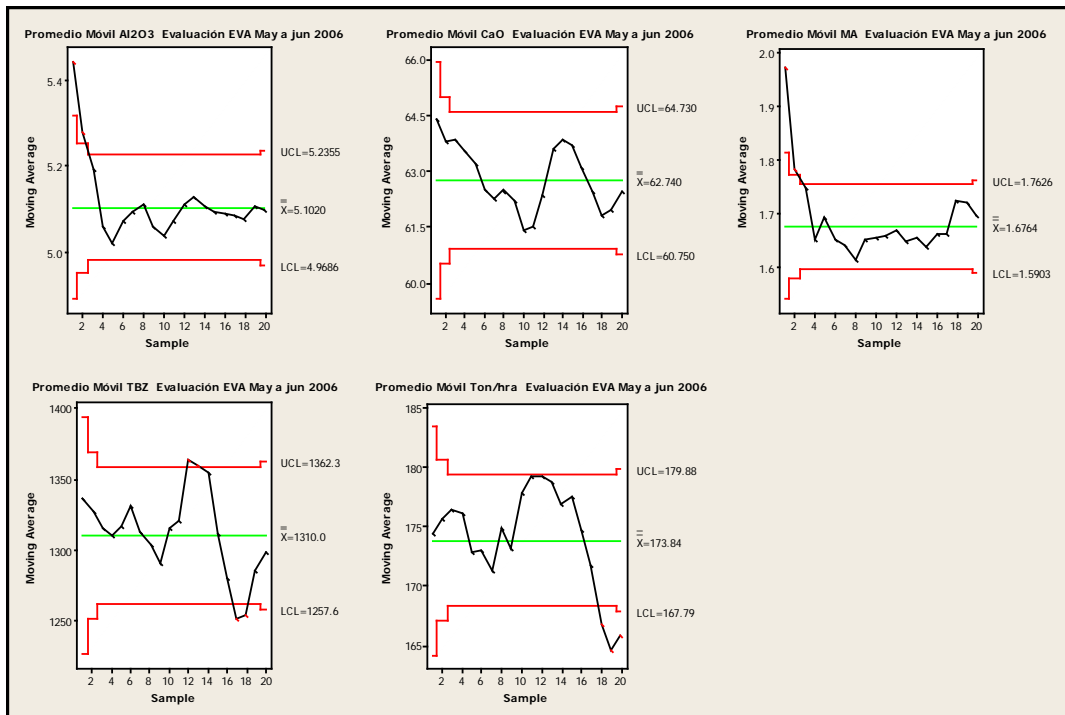


Figura No 23 Gráfica de promedios móviles Al₂O₃, CaO, MA, TBZ, TPH

La figura No 23, muestra gráficas de promedios móviles, contenido de óxido de aluminio, Al₂O₃, contenido de óxido de calcio, CaO, Temperatura de zona de clinkerización TBZ y Alimentación al horno, Ton/hr. En Al₂O₃, promedio de 5.1, no hay diferencia significativa, en CaO, con promedio de 60.75, se observa fuerte variabilidad, en MA, con promedio de 1.67, se observa que el valor medio esta corrido hacia abajo del valor medio, TBZ, el valor medio es de 1310°C, y se observa fuerte variación, lo que muestra inestabilidad en el proceso, la alimentación al horno, con promedio de 173.84 Ton/hr, también muestra variabilidad, en el proceso, lo anterior debido al desbalanceo que hay en los elementos minoritarios.

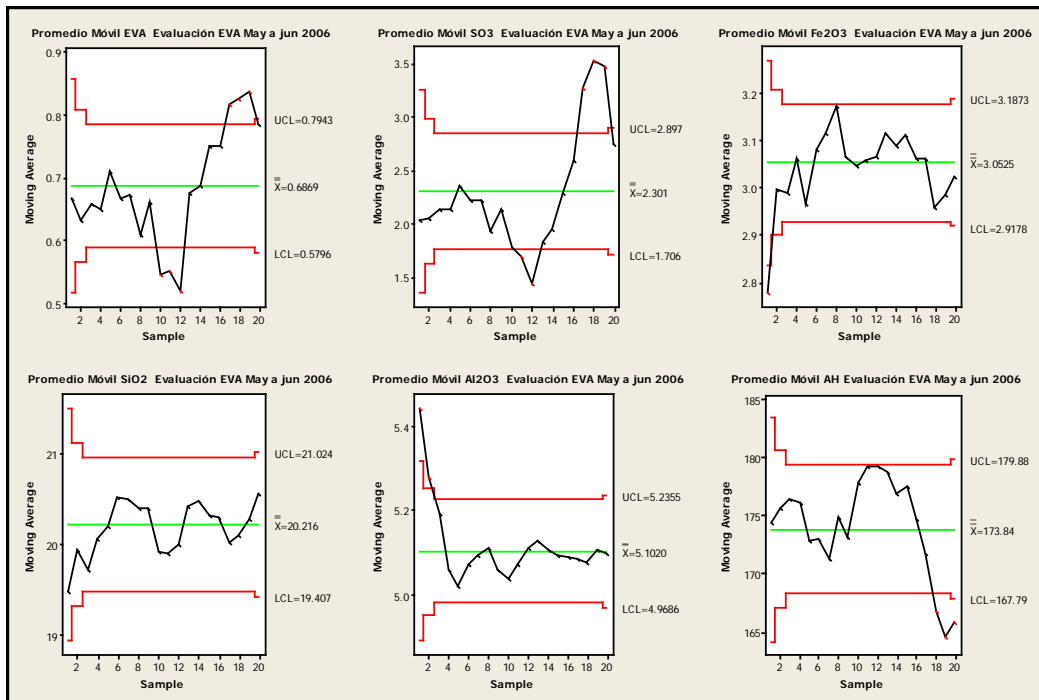


Figura No 24 Gráfica de promedios móviles EVA, SO₃,Fe₂O₃,SiO₂,Al₂O₃,Alimentación Horno

La figura No 24, muestra gráficas de promedios móviles, Evaporación de azufre, EVA, contenido de SO₃, en cono de etapa I. SO₃, contenido de óxido de fierro, Fe₂O₃, contenido de óxido de silicio, SiO₂, contenido de óxido de aluminio, Al₂O₃, EVA, con promedio de 0.6869, con fuerte variación, valores por encima, del valor medio, indica que hay alta concentración de azufre en el sistema, SO₃, con promedio de 2.301, confirma lo mencionada en EVA, Fe₂O₃, con valor medio de 3.0525, se observa variabilidad, contenidos altos de Fe₂O₃, con tendencia a mantener mayor contenido de fase líquida y viceversa, esto afecta la viscosidad de la harina cruda, afectando mayormente en valores bajos, debido a que crea pegaduras, SiO₂, con valor medio de 20.216, la gráfica muestra variabilidad, valores altos presentan

mayor tendencia a formar C_3S , Al_2O_3 , con valor medio de 5.102, no muestra variabilidad significativa, Ton/hr, con valor medio de 173.84 Ton/hr, muestra variabilidad, principalmente cuando se tiene alta concentración de SO_3 en el cono de la Etapa I.

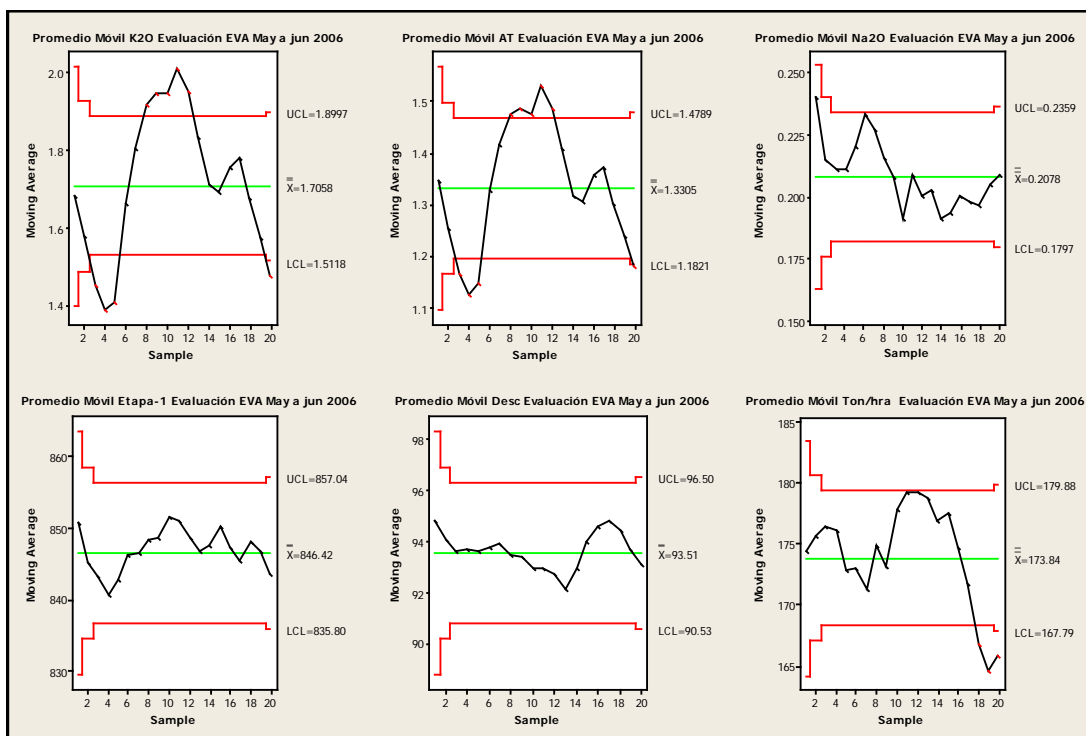


Figura No 25 Gráfica de promedios móviles K_2O , AT, Na_2O , Temp Etapa 1, Desc, Alimentación Horno

La figura No 25, muestra gráficas de promedios móviles, Contenido de óxido de potasio, K_2O , con valor promedio de 1.70, contenido de alkalis totales, AT, valor medio de 1.33, contenido de óxido de sodio, Na_2O , con valor medio de 0.2078, Temperatura material salida Etapa I, Etapa -1, con valor medio de 846.42°, Descarbonatación conocida

como, Desc. Etapa I, con valor medio de 93.51, Alimentación horno, Ton/hr, con valor medio de 173.84 Ton/hr. Al tener un incremento en el contenido de alkalis, se presenta un desbalanceo de la relación alkali-sulfato, con valores mayores, de lo especificado, donde provocan pegaduras en el sistema, así como pérdida de producción, al haber inestabilidad en la operación.

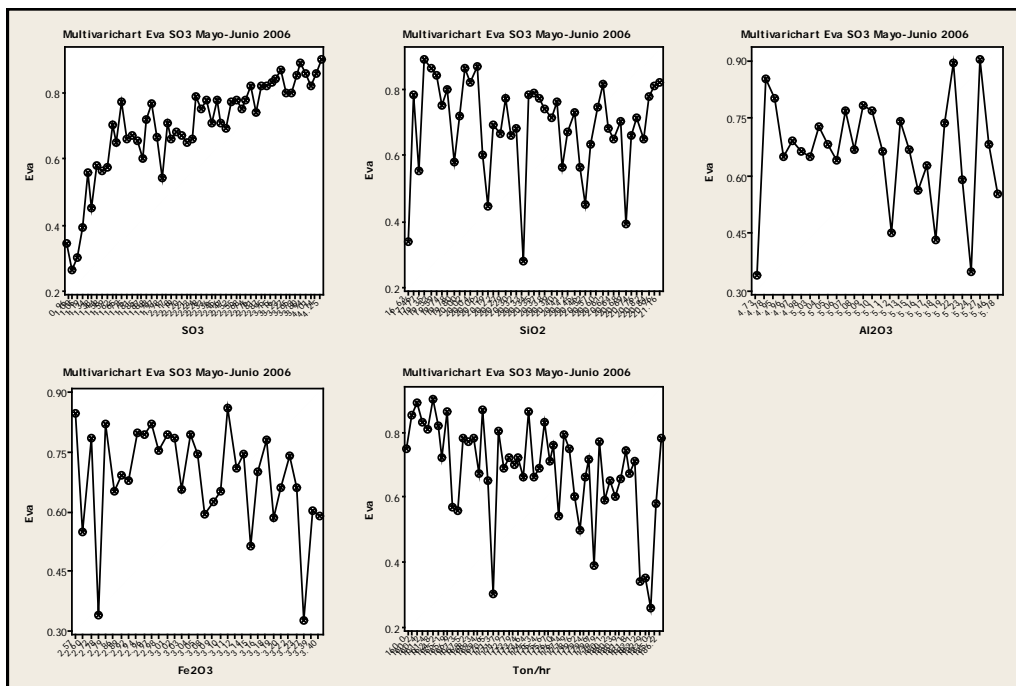


Figura No 26 Gráfica Multivarichart EVA Vs SO_3 , SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , Alimentación Horno

La figura No 26, muestra gráficas de Multivariables, Evaporación de azufre, EVA, contenido de SO_3 , en cono de etapa I. SO_3 , contenido de óxido de fierro, Fe_2O_3 , contenido de óxido de silicio, SiO_2 , contenido de óxido de aluminio, Al_2O_3 , EVA, con promedio de 0.6869, con fuerte variación, valores por encima, del valor medio, indica que hay alta concentración de azufre en el sistema, SO_3 , con promedio de 2.301, confirma lo mencionada en EVA, Fe_2O_3 , con valor medio de 3.0525, se

observa variabilidad, contenidos altos de Fe_2O_3 , con tendencia a mantener mayor contenido de fase líquida y viceversa, esto afecta la viscosidad de la harina cruda, afectando mayormente en valores bajos, debido a que crea pegaduras, SiO_2 , con valor medio de 20.216, la gráfica muestra variabilidad, valores altos presentan mayor tendencia a formar C_3S , Al_2O_3 , con valor medio de 5.102, no muestra variabilidad significativa, Ton/hr, con valor medio de 173.84 Ton/hr, muestra variabilidad, principalmente cuando se tiene alta concentración de SO_3 en el cono de la Etapa I.

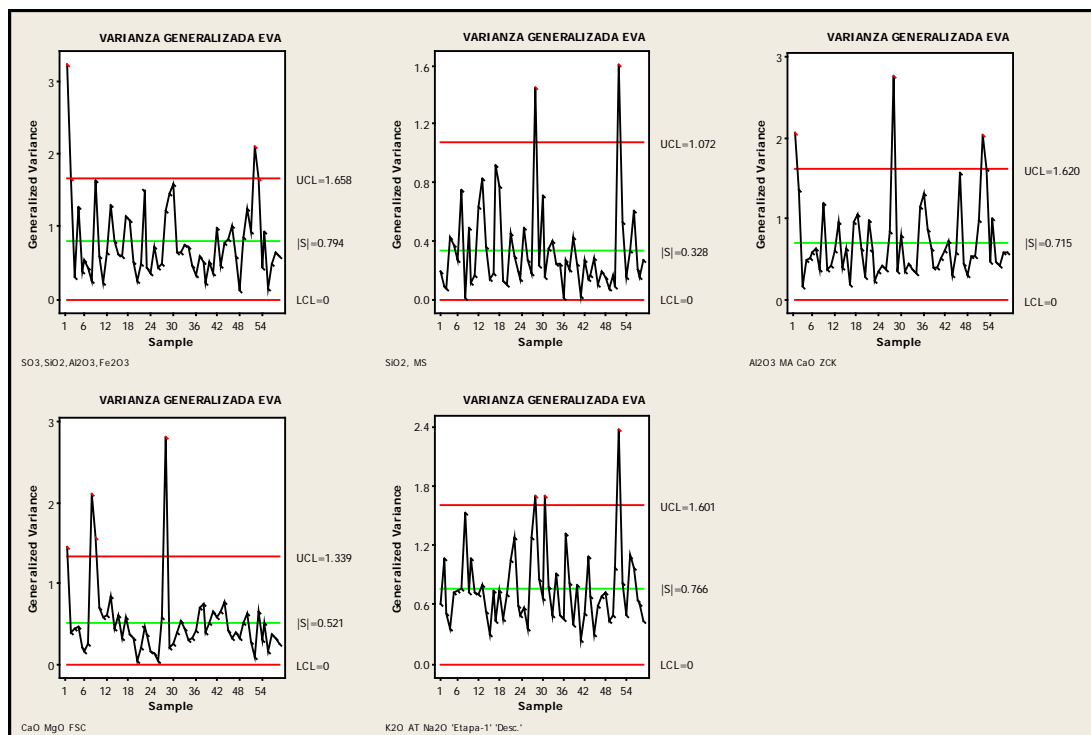


Figura No 27 Gráfica varianza Generalizada variables significativas

La figura No 27, muestra gráficas de varianza generalizada, muestran la ubicación del proceso de dos o más características del proceso relacionada durante un tiempo específico. La gráfica que asocia SO_3 ,

SiO_2 , Al_2O_3 y Fe_2O_3 , presenta una desviación media de 0.794, muestra un punto fuera de control, con desviación arriba de límite superior de 1.658. La gráfica que asocia SiO_2 , MS, presenta una desviación media de 0.328, muestra dos punto fuera de control, con desviación arriba de límite superior de 1.07. La gráfica que asocia Al_2O_3 , MA, CaO, y ZCk, presenta una desviación media de 0.715, muestra dos punto fuera de control, con desviación arriba de límite superior de 1.62. La gráfica que asocia K_2O , AT, Na_2O , Temperatura de material salida Etapa I y Descarbonatación, presenta una desviación media de 0.766, muestra un punto fuera de control, con desviación arriba de límite superior de 1.601.

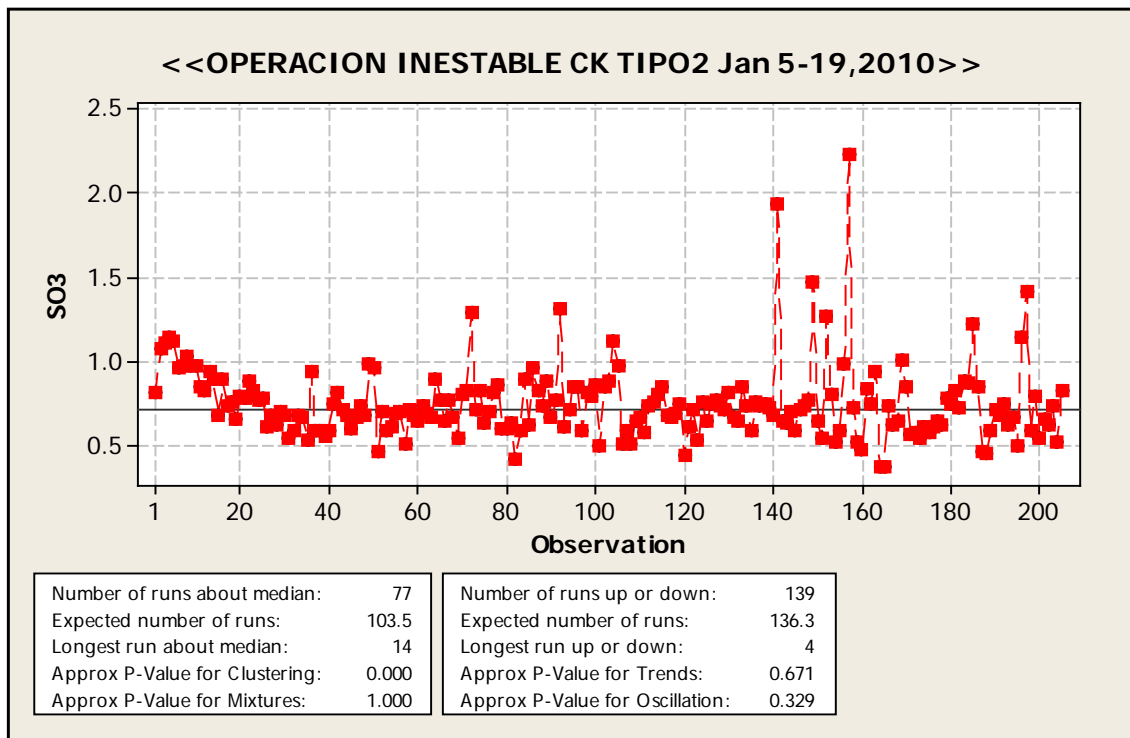


Figura No 28 Gráfica de corrida SO₃ en clinker Tipo 2

La figura No 28, muestra gráfica de corrida de SO₃ en clinker Tipo 2, la interpretación es que la prueba de agrupamiento es significativa, podemos concluir que se están presentando causas especiales en el proceso y es necesario realizar una investigación más a fondo; por otro lado la prueba de aleatoriedad, nos dice que las corridas observadas son mayores que las esperadas, dando como resultado oscilación [los datos varían hacia arriba y hacia abajo]; en enero 13, se observa tendencia a disminuir el SO₃, lo cual nos lleva a pensar que se está quedando en el sistema. La mediana del SO₃ es de 0.71, sin embargo en la mayoría de las observaciones hay valores bajos, menores que la mediana, lo que nos confirma un desbalanceo de Alk/SO₃, el exceso de SO₃, crea formación y descomposición de CaSO₄, favoreciendo pegaduras en el sistema.

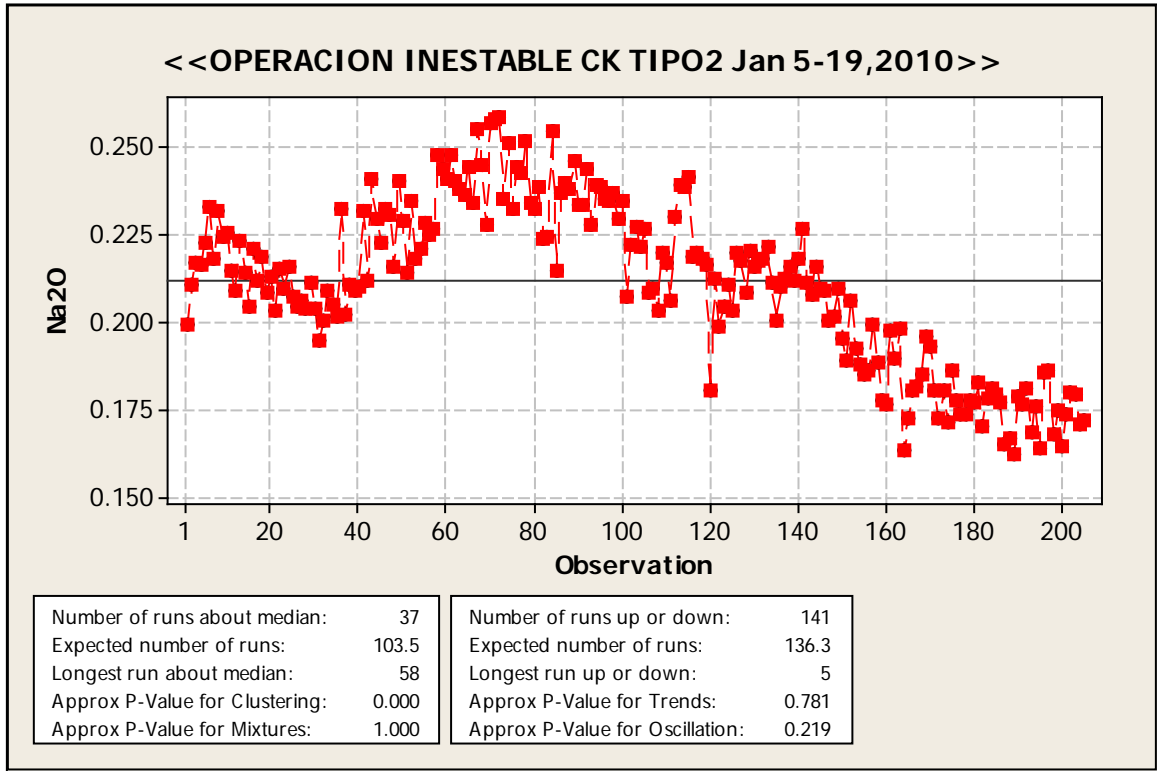


Figura No 29 Gráfica de corrida Na_2O en clinker Tipo 2

La figura No 29, muestra gráfica de corrida de Na_2O en clinker Tipo 2, la interpretación es que la prueba de agrupamiento es significativa, podemos concluir que se están presentando causas especiales en el proceso y es necesario realizar una investigación más a fondo; por otro lado la prueba de aleatoriedad, nos dice que las corridas observadas son mayores que las esperadas, dando como resultado oscilación [los datos varían hacia arriba y hacia abajo]; en enero 13, se observa tendencia a disminuir el Na_2O , lo cual nos lleva a pensar que se está quedando en el sistema. La mediana del Na_2O es de 0.212, sin embargo en la mayoría de las observaciones hay valores bajos, menores que la mediana, lo que nos confirma un desbalanceo de

Alk/SO₃, el exceso de Alkalís, favoreciendo pegaduras en el sistema, conentrandose en la Etapa I.

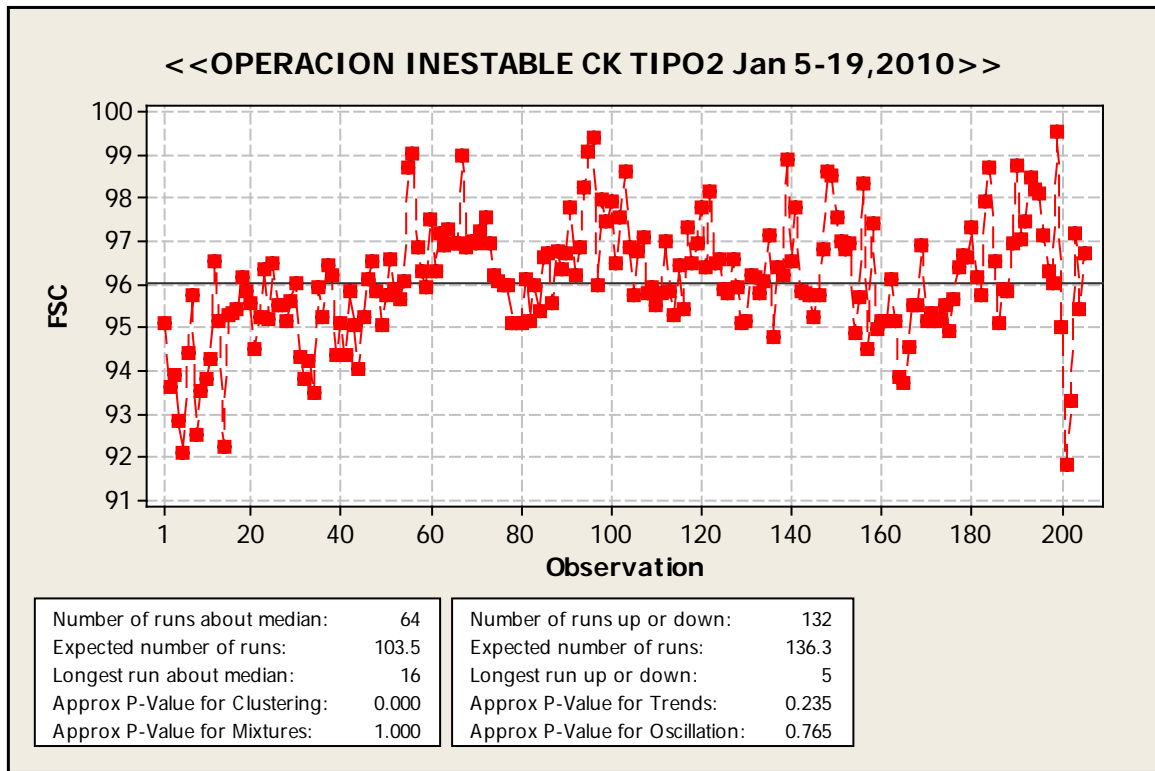


Figura No 30 Gráfica de corrida FSC en clinker Tipo 2

La figura No 30, muestra gráfica de corrida de Factor de saturación de cal, FSC, en clinker Tipo 2, la interpretación es que la prueba de agrupamiento es significativa, podemos concluir que se están presentando causas especiales en el proceso y es necesario realizar una investigación más a fondo; por otro lado la prueba de aleatoriedad, nos dice que las corridas observadas son menores que las esperadas, dando como resultado tendencia, en enero 13, se observa tendencia a alto FSC, lo cuál nos hace pensar que la variación en el factor desaturación de cal, provoca una inestabilidad en la operación. Los valores guía para

una buena uniformidad en clinker, nos lleva a una desviación estándar de 1.2 Vs 1.36 en este análisis.

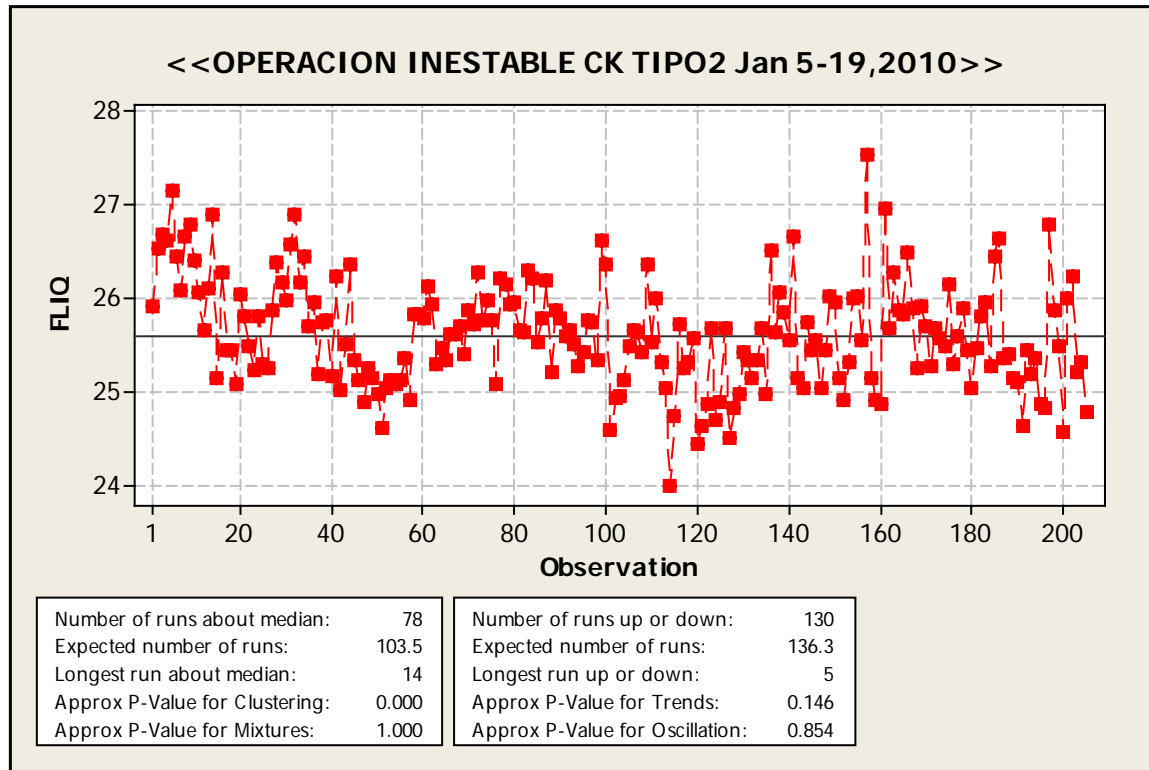


Figura No 31 Gráfica de corrida Fase Líquida en clinker Tipo 2

La figura No 31, muestra gráfica de corrida de Fase líquida, FLIQ, en clinker Tipo 2, la interpretación es que la prueba de agrupamiento es significativa, podemos concluir que se están presentando causas especiales en el proceso y es necesario realizar una investigación más a fondo; por otro lado la prueba de aleatoriedad, nos dice que las corridas observadas son mayores que las esperadas, dando como

resultado oscilación [los datos varían hacia arriba y hacia abajo]; se observa variabilidad en FLIQ, esto nos dice que hay variación en los fundentes ferrita y aluminatos, exceso de FLIQ, provocará baja porosidad en el clinker, esto incide en un mayor tiempo de material en la zona de temperatura máxima, provocando a su vez un exceso de evaporación de SO_3 , por otro lado una alta porosidad de clinker, provocará una quema insuficiente de clinker, provocando condiciones reductoras en el sistema y favoreciendo la evaporación de azufre en la zona de quemado.

ANOVA Table Using the Sample Averages					
Factor	df	Sum of Sq.	Mean Sq	F	p
A	1	280.845	280.845	14042.25	0.00537
B	1	0.02	0.02	1	0.5
A X B	1	14.045	14.045	702.25	0.02401
C	1	0.245	0.245	12.25	0.17717106
A X C	1	33.62	33.62	1681	0.01552
B X C	1	0.845	0.845	42.25	0.09717958
A X B X C	*	*	*	*	*
Error	1	0.02	0.02		
Total	7	329.64			

Tabla No XVIII Análisis de Varianza de DOE, Factorial completo 2³

En la sección 6.2.15, se propone llevar a cabo, un DOE, Diseño de Experimentos 2³, por sus siglas en inglés, que es un factorial completo, por sus siglas en inglés y la metodología, mostrada en la Tabla No XIII, el resultado obtenido se presenta en la tabla XVIII, nos presenta una

tabla ANOVA, análisis de varianza del DOE, por sus siglas en inglés, el diseño es un factorial completo 2^3 , la cuál nos muestra los efectos principales, efecto A, que representa la evaporación del azufre; el efecto B, representa el retenido en la malla 170 [90 micras]; el efecto C, representa el % de descarbonatación del material saliendo de la etapa I; la interacción A X B; la interacción A X C; la interacción B X C; la interacción de A X B X C, así como el error experimental; los grados de libertad, df, por sus siglas en inglés; la suma de cuadrados, Sum of sq; el cuadrado medio, Mean Sq; F, el estadístico Fisher; p value, la cuál nos da si el factor o la interacción es o no es significativa, desde el punto de vista estadístico. El resultado de la ANOVA, es que A, con $p = 0.00537$; A X B, con valor de $p = 0.024$ y A X C, con $p = 0.0155$, son significativos.

Effects Table	Effect	Abs. Effect	Rank
Effect of A	-11.850	11.85	1
Effect of B	-0.100	0.1	6
Effect of A X B	-2.650	2.65	3
Effect of C	0.350	0.35	5
Effect of A X C	-4.100	4.1	2
Effect of B X C	0.650	0.65	4
Effect of A X B X C	0.100	0.1	6

Tabla No XIX Efectos e Interacciones de DOE, Factorial completo 2^3

La tabla XIX, nos presenta, los resultados obtenidos de los efectos e interacciones, mencionados en la Tabla XVIII, así como sus valores absolutos y su jerarquización. El Efecto A = 11.85; Efecto A X C = 4.1; Efecto A X B = 2.65.

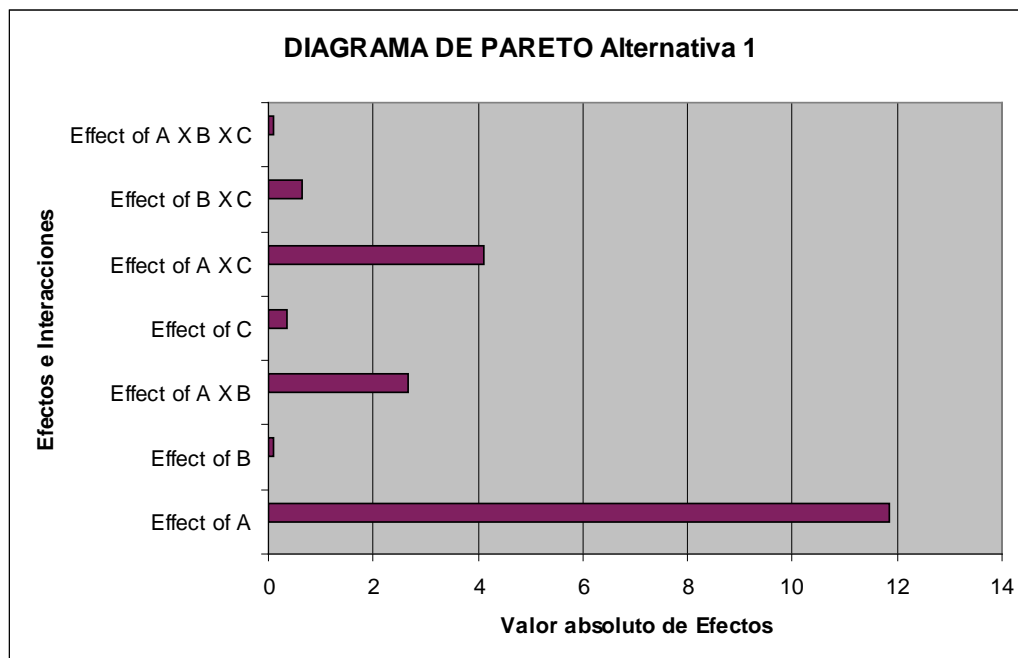
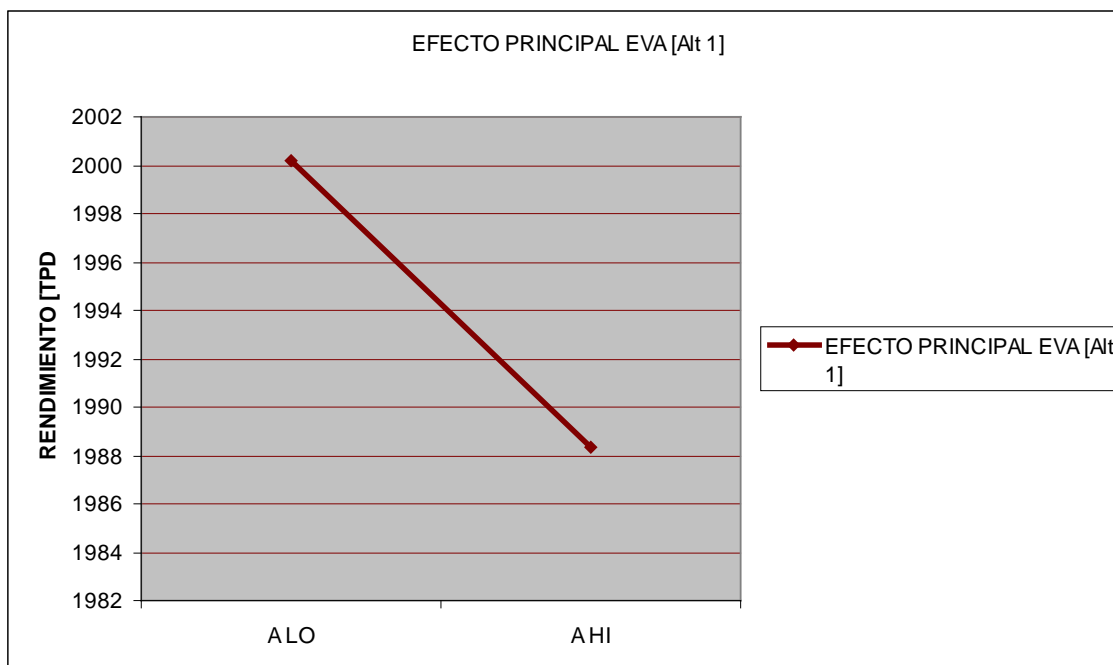


Figura No 32 Gráfica de Pareto Diseño de Experimentos Alternativa No 1

La figura No 32, nos muestra la gráfica de pareto del DOE alternativa No 1, donde jerarquiza los efectos; Efecto A, seguido de Efecto A X C y Efecto A X B, los cuales mostraron que eran los más representativos, y son a los que hay que ponerles especial atención.



La figura No 33, nos muestra el Efecto A, que es el efecto principal de la Evaporación de azufre, de la alternativa 1, planteado en los dos niveles, ALO, que es el Efecto A, en el nivel bajo, AHI, que es el Efecto A, en el nivel alto, contra el rendimiento [TPD], el resultado es:

Cuando la evaporación de azufre esta en el nivel bajo, nos confirma que el rendimiento de la alimentación al horno, es mejor que cuando está en su nivel bajo.

Donde se observa que hay una pérdida de producción, debido a la inestabilidad de operación del horno, por los fenómenos de circulación:

- a) Relación molar alkali/sulfato, sección 6.2.6
- b) Los elementos alcalinos, sección 6.2.9
- c) Ciclos de los elementos de circulación, sección 6.2.10
- d) Volatilidad de los elementos circulantes, sección 6.2.11
- e) El elemento cloro, sección 6.2.8
- f) El elemento azufre, sección 6.2.14.7

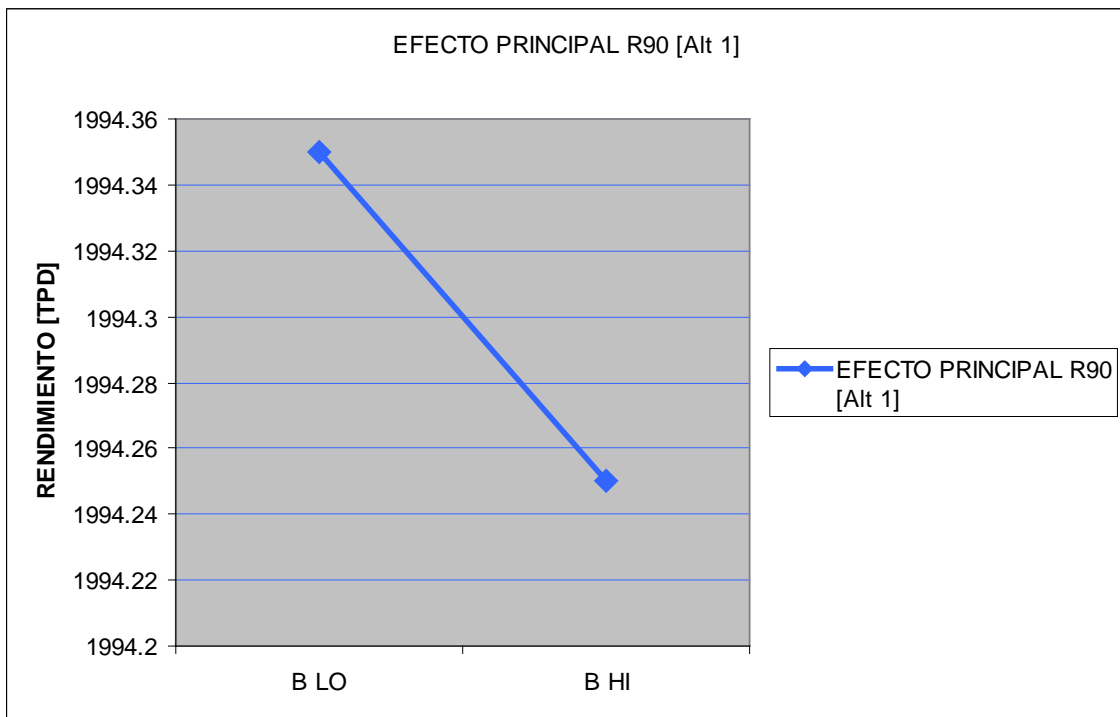


Figura No 34 Gráfica de Efecto Principal Residuo 90 micras Diseño de Experimentos Alternativa No 1

La figura No 34, nos muestra el Efecto B, que es el efecto principal de la residuo malla 170, o bien el R90 micras, de la alternativa 1, planteado en los dos niveles, BLO, que es el Efecto B, en el nivel bajo, BHI, que es el Efecto B, en el nivel alto, contra el rendimiento [TPD], el resultado es:

Cuando el R90 esta en el nivel bajo, nos confirma que el rendimiento de la alimentación al horno, es mejor que cuando está en su nivel bajo.

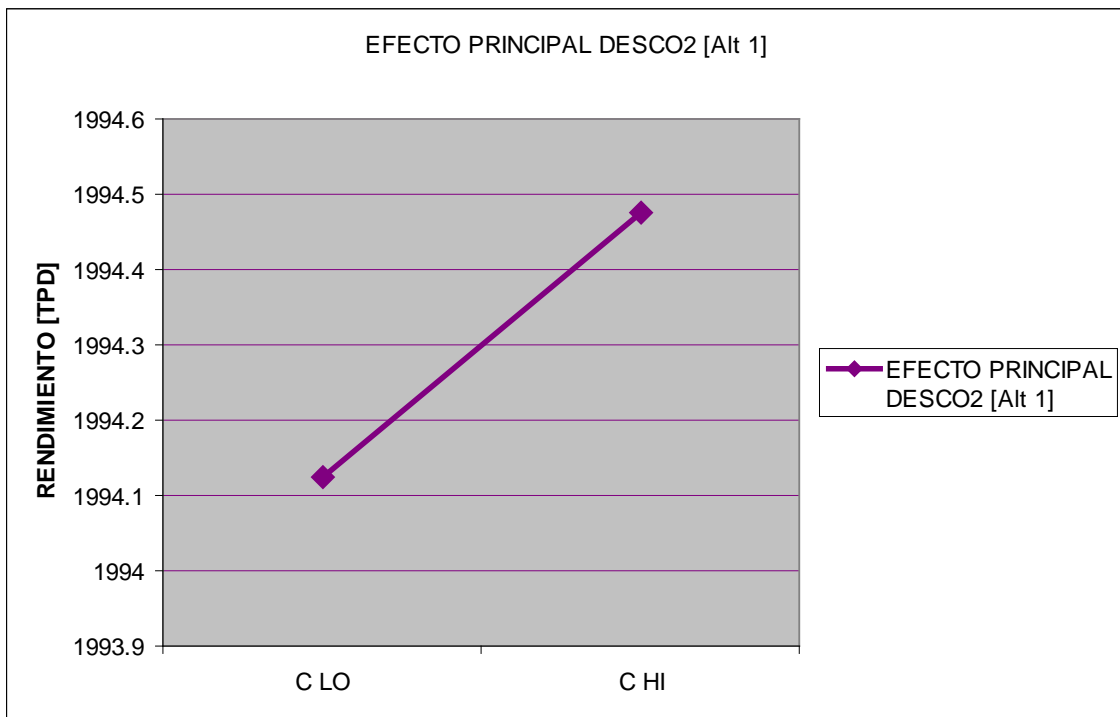


Figura No 35 Gráfica de Efecto Principal Descarbonatación Diseño de Experimentos Alternativa No 1

La figura No 35, nos muestra el Efecto C, que es el efecto principal del % de Descarbonatación del material en la Etapa I, de la alternativa 1, planteado en los dos niveles, CLO, que es el Efecto C, en el nivel bajo, CHI, que es el Efecto C, en el nivel alto, contra el rendimiento [TPD], el resultado es:

Cuando el el % de Descarbonatación del material en la Etapa I esta en el nivel bajo, el rendimiento de la alimentación al horno, es bajo, y a la inversa, cuando el % de Descarbonatación del material en la Etapa I es alto, el rendimiento de la alimentación al horno, es alto.

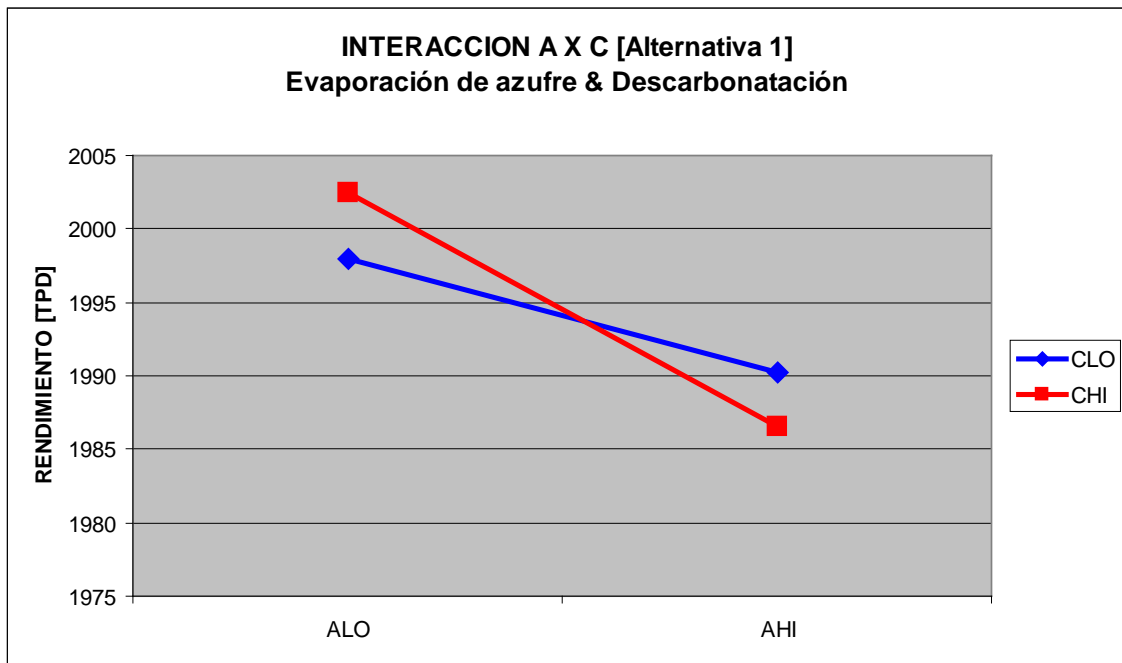


Figura No 36 Gráfica de Interacción A X C Eva & Descarbonatación Diseño de Experimentos Alternativa No 1

La figura No 36, nos muestra el Efecto A X C, que es la interacción, entre el Factor A, que es la Evaporación del azufre y el Efecto C, que es el % de Descarbonatación del material en la Etapa I, de la alternativa 1, planteado en los dos niveles, ALO, y AHI, del Efecto A, así como el nivel bajo CLO, y el nivel alto CHI, del Efecto C, contra el rendimiento [TPD], el resultado es:

Cuando el el Efecto A, esta en nivel bajo, ALO y el Efecto C esta en el nivel alto, CHI, el rendimiento de la alimentación al horno, es alto.

A la inversa, cuando el Efecto A, esta en nivel alto, AHI y el Efecto C esta en el nivel alto, CHI, el rendimiento de la alimentación al horno, es bajo.

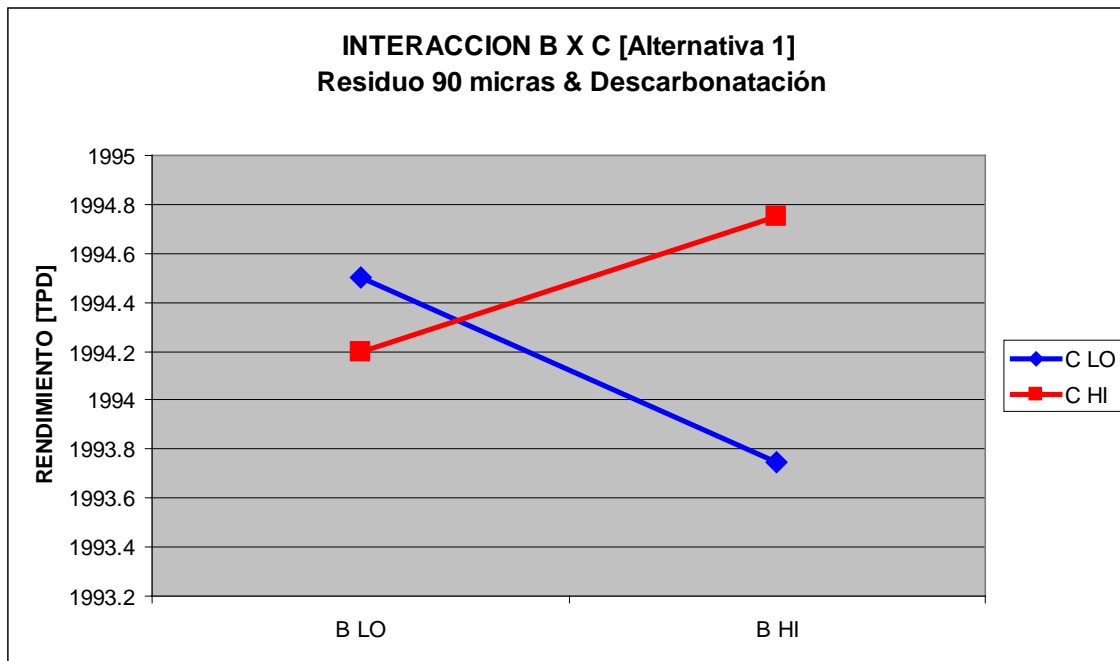


Figura No 37 Gráfica de Interacción B X C R90 & Descarbonatación Diseño de Experimentos Alternativa No 1

La figura No 37, nos muestra el Efecto B X C, que es la interacción, entre el Factor B, que es el residuo de 90 micras y el Efecto C, que es el % de Descarbonatación del material en la Etapa I, de la alternativa 1, ploteado en los dos niveles, BLO, y BHI, del Efecto B, así como el nivel bajo CLO, y el nivel alto CHI, del Efecto C, contra el rendimiento [TPD], el resultado es:

Cuando el el Efecto B, esta en nivel alto, BHI y el Efecto C esta en el nivel alto, CHI, el rendimiento de la alimentación al horno, es alto.

A la inversa, cuando el Efecto B, esta en nivel alto, BHI y el Efecto C esta en el nivel bajo, CLO, el rendimiento de la alimentación al horno, es bajo.

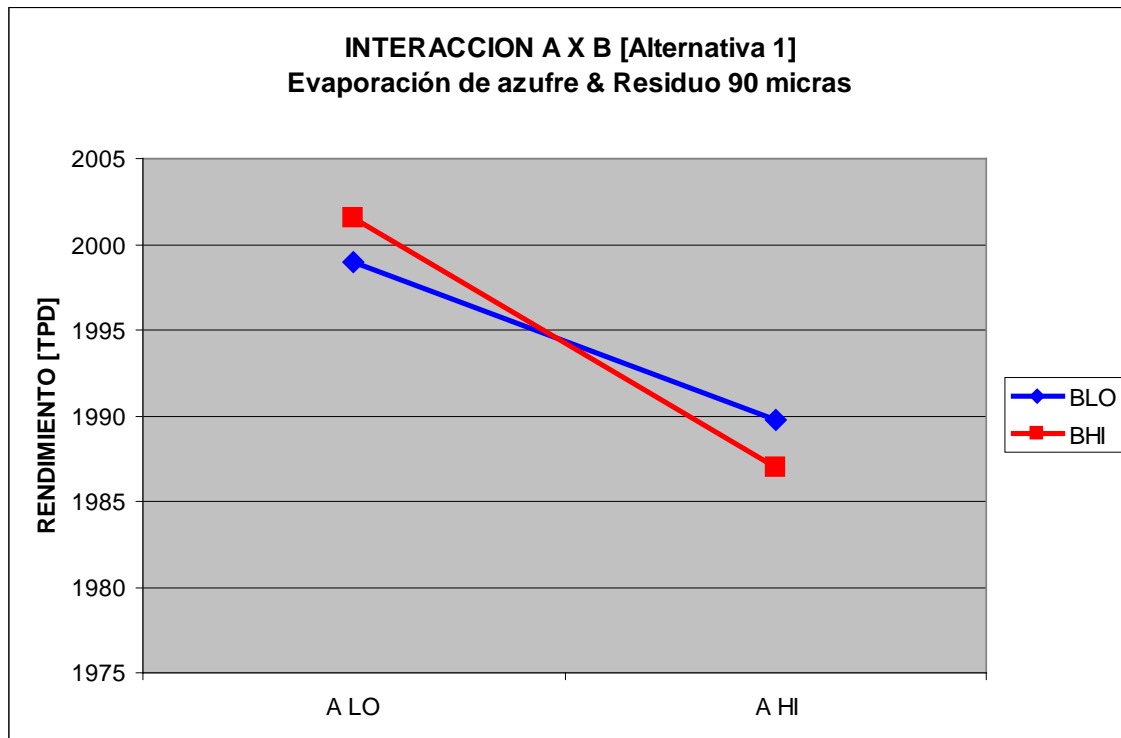


Figura No 38 Gráfica de Interacción A X B Evaporación & R90 Diseño de Experimentos Alternativa No 1

La figura No 38, nos muestra el Efecto A X B, que es la interacción, entre el Factor A, que es el % Evaporación de azufre y el Efecto B, que es el Residuo 90 micras, de la alternativa 1, planteado en los dos niveles, ALO, y AHI, del Efecto B, así como el nivel bajo BLO, y el nivel alto BHI, del Efecto B, en el nivel alto, contra el rendimiento [TPD], el resultado es:

Cuando el el Efecto A, esta en nivel bajo, ALO y el Efecto B esta en el nivel alto, BHI, el rendimiento de la alimentación al horno, es alto.

A la inversa, cuando el Efecto A, esta en nivel alto, AHI y el Efecto B esta en el nivel alto, BHI, el rendimiento de la alimentación al horno, es bajo.

Para la alternativa No 1, El Rendimiento medio fué de 1984.5 TPD, y los valores recomendados para Evaporación 0.7, R90 de 19.63% y % Descarbonatación 90.5.

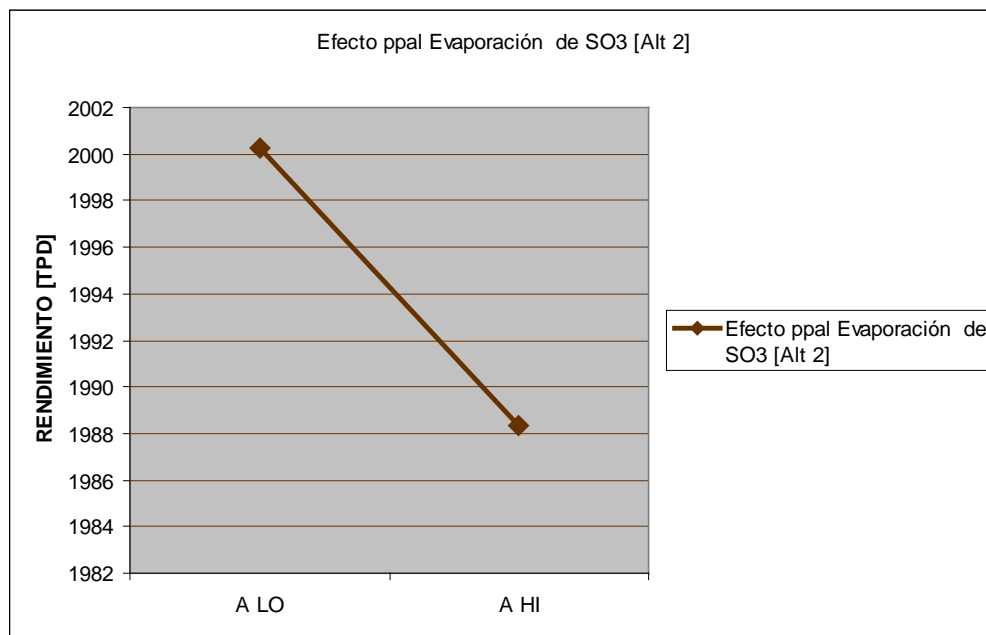


Figura No 39 Gráfica de Efecto Principal Evaporación Diseño de Experimentos

Alternativa No 2

La figura No 39, nos muestra el Efecto A, que es el efecto principal de la Evaporación de azufre, de la alternativa 2, planteado en los dos niveles, ALO, que es el Efecto A, en el nivel bajo, AHI, que es el Efecto A, en el nivel alto, contra el rendimiento [TPD], el resultado es:

Cuando la evaporación de azufre esta en el nivel bajo, nos confirma que el rendimiento de la alimentación al horno, es mejor que cuando está en su nivel bajo.

Donde se observa que hay una pérdida de producción, debido a la inestabilidad de operación del horno, por los fenómenos de circulación:

- g) Relación molar alkali/sulfato, sección 6.2.6
- h) Los elementos alcalinos, sección 6.2.9
- i) Ciclos de los elementos de circulación, sección 6.2.10
- j) Volatilidad de los elementos circulantes, sección 6.2.11
- k) El elemento cloro, sección 6.2.8
- l) El elemento azufre, sección 6.2.14.7

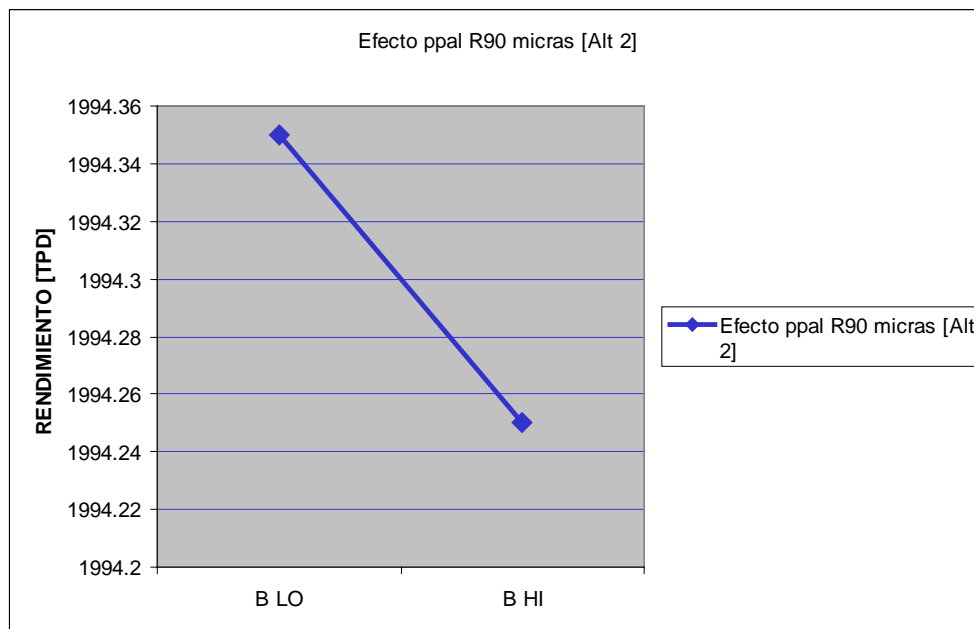


Figura No 40 Gráfica de Efecto Principal Residuo 90 micras Diseño de Experimentos
 Alternativa No 2

La figura No 40, nos muestra el Efecto B, que es el efecto principal de la residuo malla 170, o bien el R90 micras, de la alternativa 2, planteado en los dos niveles, BLO, que es el Efecto B, en el nivel bajo, BHI, que es el Efecto B, en el nivel alto, contra el rendimiento [TPD], el resultado es:

Cuando el R90 esta en el nivel bajo, nos confirma que el rendimiento de la alimentación al horno, es mejor que cuando está en su nivel bajo.

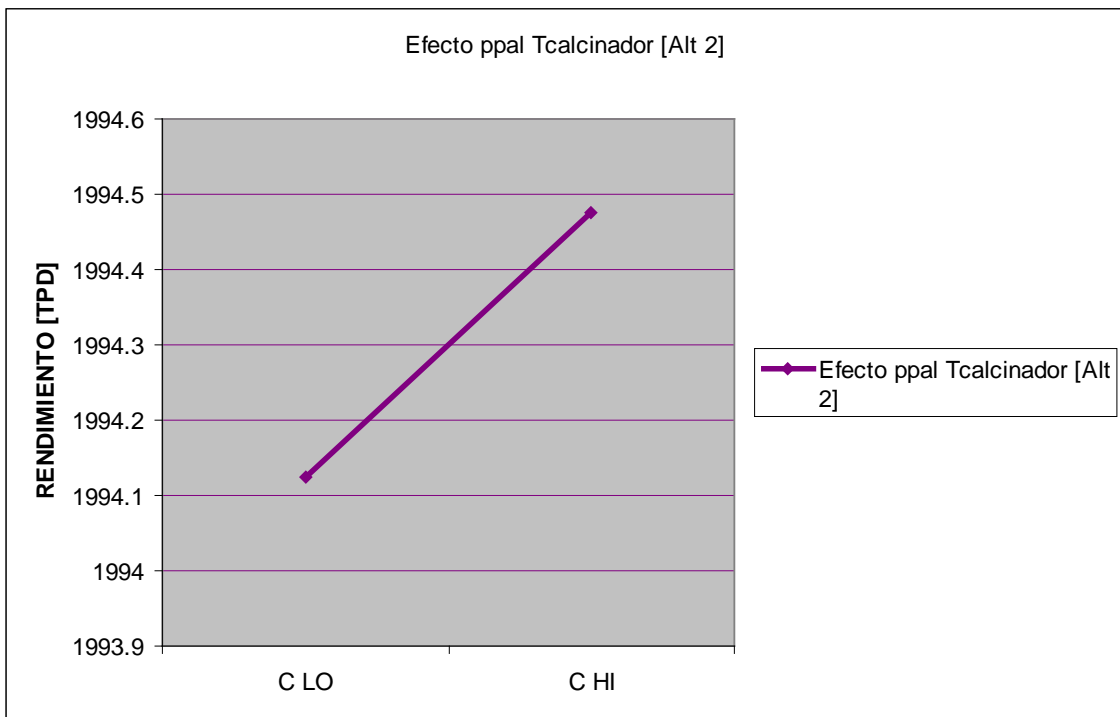


Figura No 41 Gráfica de Efecto Principal Temperatura Calcinador Diseño de Experimentos Alternativa No 2

La figura No 41, nos muestra el Efecto C, que es el efecto principal de la Temperatura del calcinador, de la alternativa 2, planteado en los dos niveles, C LO, que es el Efecto C, en el nivel bajo, CHI, que es el Efecto C, en el nivel alto, contra el rendimiento [TPD], el resultado es:

Cuando el la Temperatura del calcinador, esta en el nivel bajo, el rendimiento de la alimentación al horno, es bajo, y a la inversa, cuando la Temperatura del calcinador es alto, el rendimiento de la alimentación al horno, es alto.

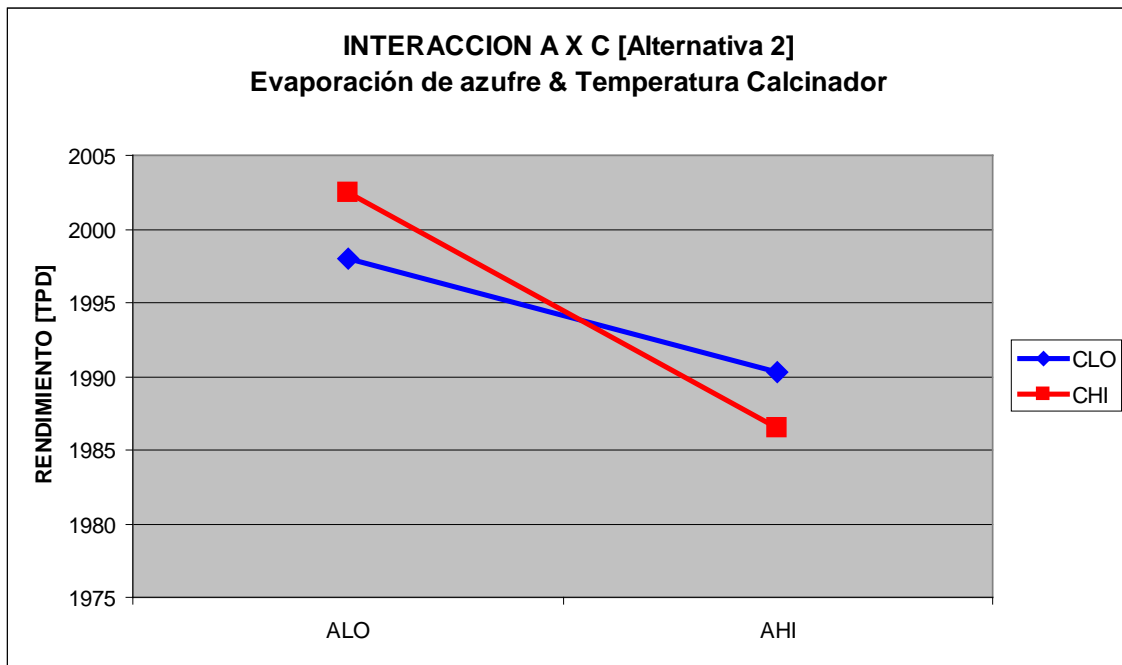


Figura No 42 Gráfica de Interacción A X C Eva & Temp. Calcinador Diseño de Experimentos Alternativa No 2

La figura No 42, nos muestra el Efecto A X C, que es la interacción, entre el Factor A, que es la Evaporación del azufre y el Efecto C, que es la Temperatura del calcinador, de la alternativa 2, planteado en los dos niveles, ALO, y AHI, del Efecto A, así como el nivel bajo CLO, y el nivel alto CHI, del Efecto C, contra el rendimiento [TPD], el resultado es:

Cuando el el Efecto A, esta en nivel bajo, ALO y el Efecto C esta en el nivel alto, CHI, el rendimiento de la alimentación al horno, es alto.

A la inversa, cuando el Efecto A, esta en nivel alto, AHI y el Efecto C esta en el nivel alto, CHI, el rendimiento de la alimentación al horno, es bajo.

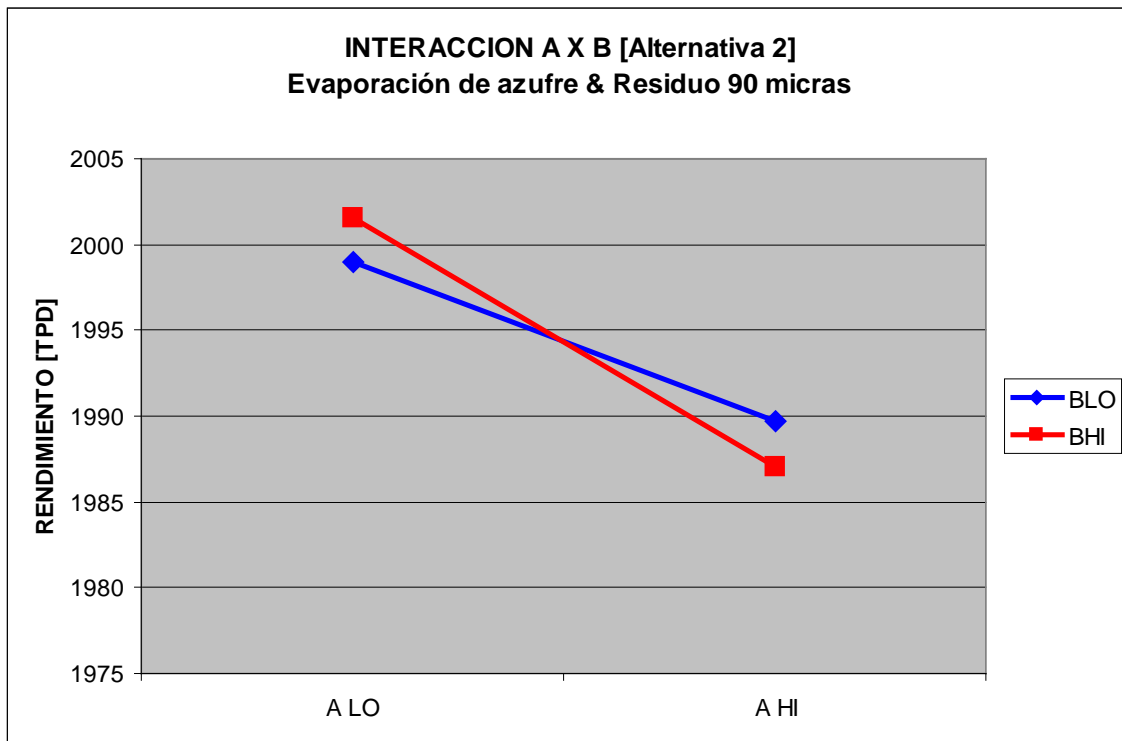


Figura No 43 Gráfica de Interacción A X B, Eva & Residuo 90 micras, Diseño de Experimentos Alternativa No 2

La figura No 43, nos muestra el Efecto A X B, que es la interacción, entre el Factor A, que es el % Evaporación de azufre y el Efecto B, que es el Residuo 90 micras, de la alternativa 2, planteado en los dos niveles, ALO, y AHI, del Efecto B, así como el nivel bajo BLO, y el nivel alto BHI, del Efecto B, en el nivel alto, contra el rendimiento [TPD], el resultado es:

Cuando el el Efecto A, esta en nivel bajo, ALO y el Efecto B esta en el nivel alto, BHI, el rendimiento de la alimentación al horno, es alto.

A la inversa, cuando el Efecto A, esta en nivel alto, AHI y el Efecto B esta en el nivel alto, BHI, el rendimiento de la alimentación al horno, es bajo.

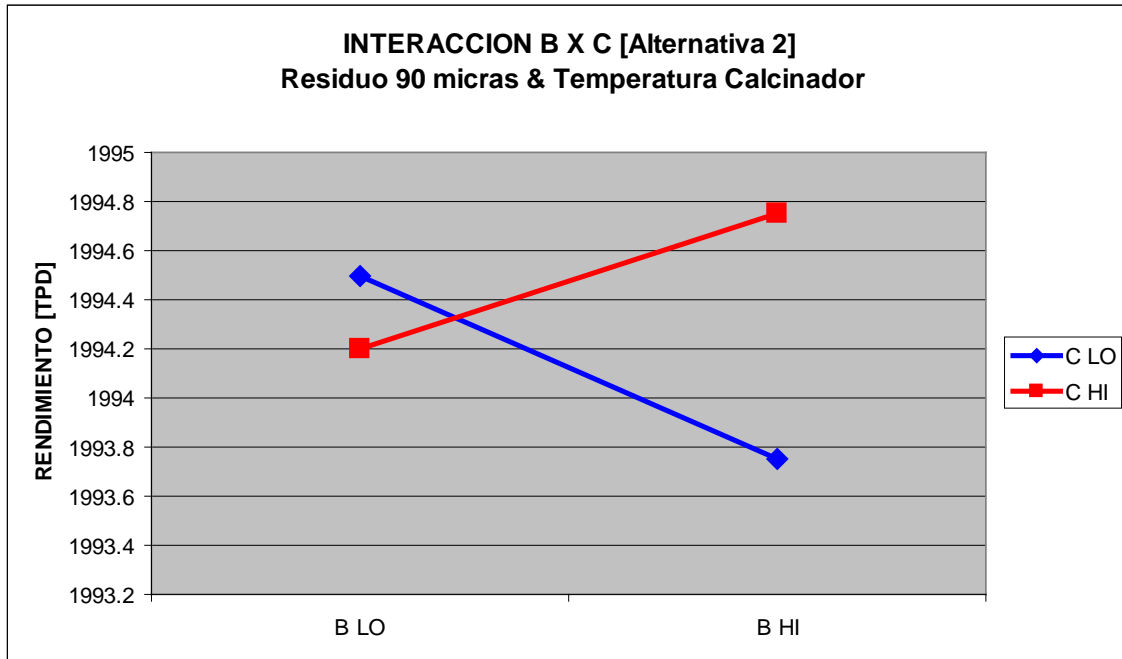


Figura No 44 Gráfica de Interacción B X C, Residuo 90 micras & Temp Calc., Diseño de Experimentos Alternativa No 2

La figura No 44, nos muestra el Efecto B X C, que es la interacción, entre el Factor B, que es el residuo de 90 micras y el Efecto C, que es Temperatura del calcinador, de la alternativa 2, planteado en los dos niveles, BLO, y BHI, del Efecto B, así como el nivel bajo CLO, y el nivel alto CHI, del Efecto C, contra el rendimiento [TPD], el resultado es:

Cuando el el Efecto B, esta en nivel alto, BHI y el Efecto C esta en el nivel alto, CHI, el rendimiento de la alimentación al horno, es alto.

A la inversa, cuando el Efecto B, esta en nivel alto, BHI y el Efecto C esta en el nivel bajo, CLO, el rendimiento de la alimentación al horno, es bajo.

Para la alternativa No 2, El Rendimiento medio fué de 1985.0 TPD, y los valores recomendados para Evaporación 0.7, R90 de 19.63% y Temperatura del calcinador de 850°C.

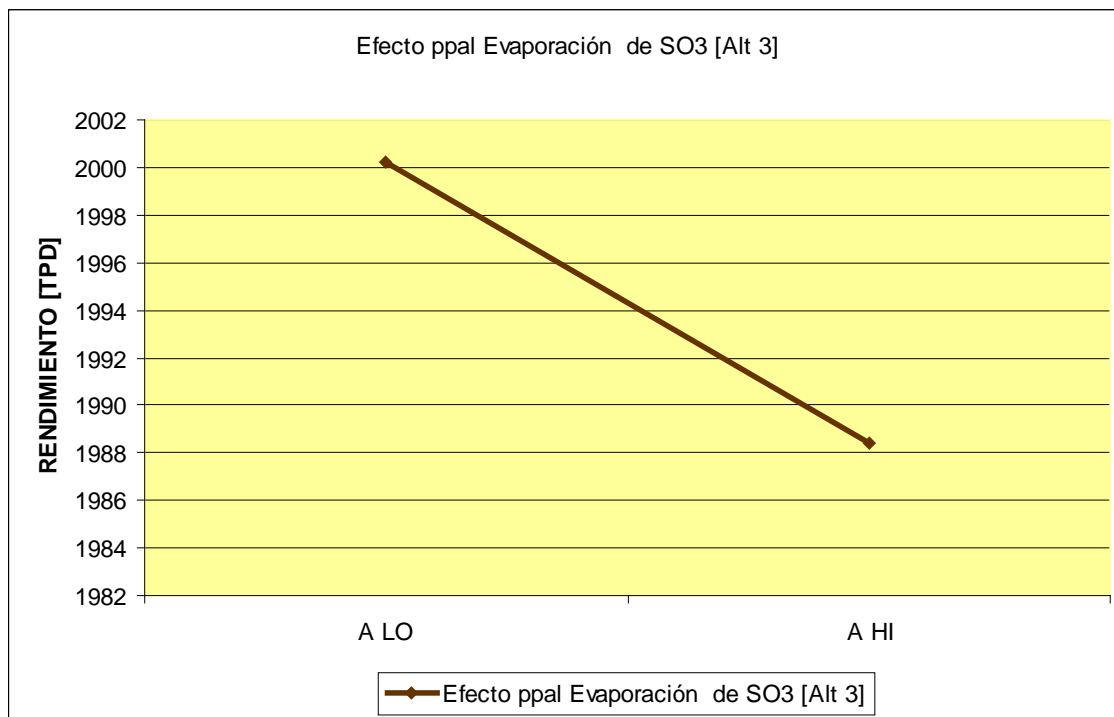


Figura No 45 Gráfica de Efecto Principal, Evaporación, Diseño de Experimentos Alternativa No 3

La figura No 45, nos muestra el Efecto A, que es el efecto principal de la Evaporación de azufre, de la alternativa 3, planteado en los dos niveles, ALO, que es el Efecto A, en el nivel bajo, AHI, que es el Efecto A, en el nivel alto, contra el rendimiento [TPD], el resultado es:

Cuando la evaporación de azufre esta en el nivel bajo, nos confirma que el rendimiento de la alimentación al horno, es mejor que cuando está en su nivel bajo.

Donde se observa que hay una pérdida de producción, debido a la inestabilidad de operación del horno, por los fenómenos de circulación:

- m) Relación molar alkali/sulfato, sección 6.2.6
- n) Los elementos alcalinos, sección 6.2.9
- o) Ciclos de los elementos de circulación, sección 6.2.10
- p) Volatilidad de los elementos circulantes, sección 6.2.11
- q) El elemento cloro, sección 6.2.8
- r) El elemento azufre, sección 6.2.14.7

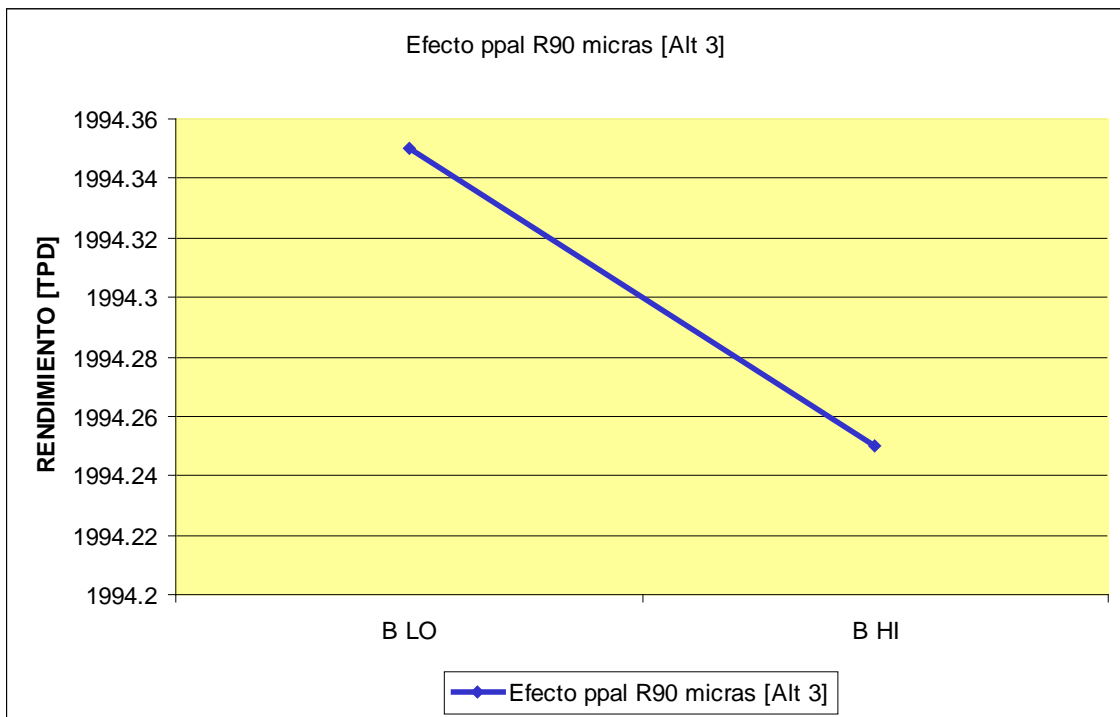


Figura No 46 Gráfica de Efecto Principal, Residuo 90 micras, Diseño de Experimentos Alternativa No 3

La figura No 46, nos muestra el Efecto B, que es el efecto principal de la residuo malla 170, o bien el R_{90} micras, de la alternativa 3, planteado en los dos niveles, BLO, que es el Efecto B, en el nivel bajo, BHI, que es el Efecto B, en el nivel alto, contra el rendimiento [TPD], el resultado es:

Cuando el R_{90} esta en el nivel bajo, nos confirma que el rendimiento de la alimentación al horno, es mejor que cuando está en su nivel bajo.

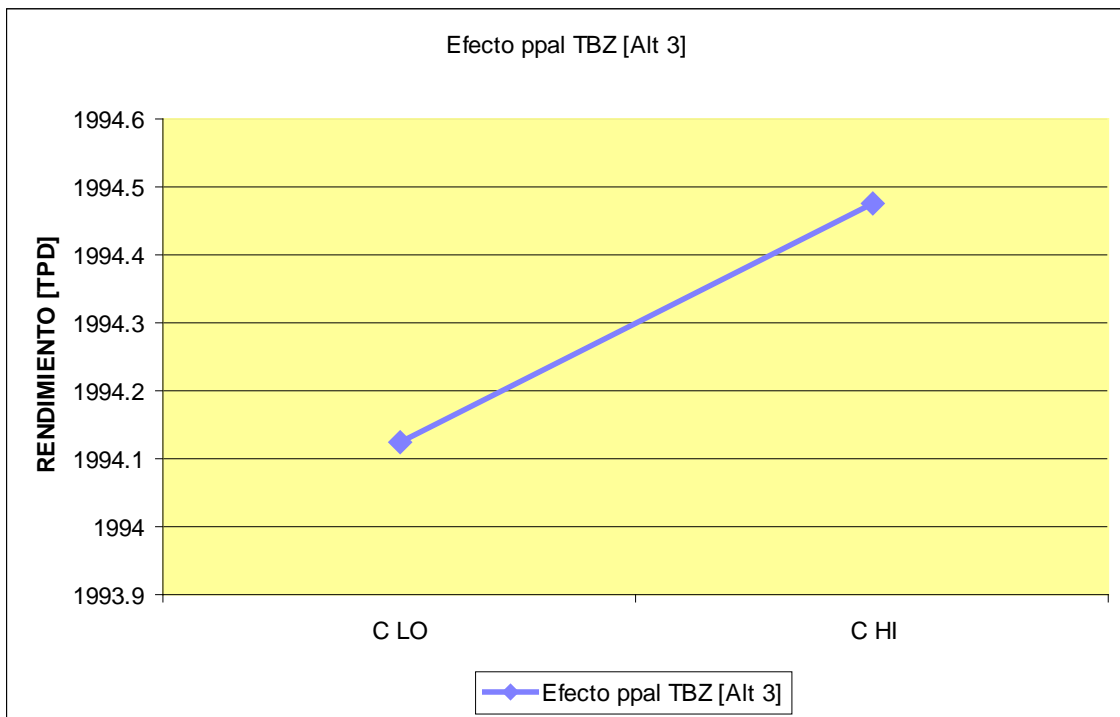


Figura No 47 Gráfica de Efecto Principal, Temp. de Zona de Ck, Diseño de Experimentos Alternativa No 3

La figura No 47, nos muestra el Efecto C, que es el efecto principal de la Temperatura de la zona de clinkerización, de la alternativa 3, planteado en los dos niveles, CLO, que es el Efecto C, en el nivel bajo, CHI, que es el Efecto C, en el nivel alto, contra el rendimiento [TPD], el resultado es:

Cuando el la Temperatura de la zona de clinkerización, esta en el nivel bajo, el rendimiento de la alimentación al horno, es bajo, y a la inversa, cuando la temperatura de la zona de clinkerización es alto, el rendimiento de la alimentación al horno, es alto.

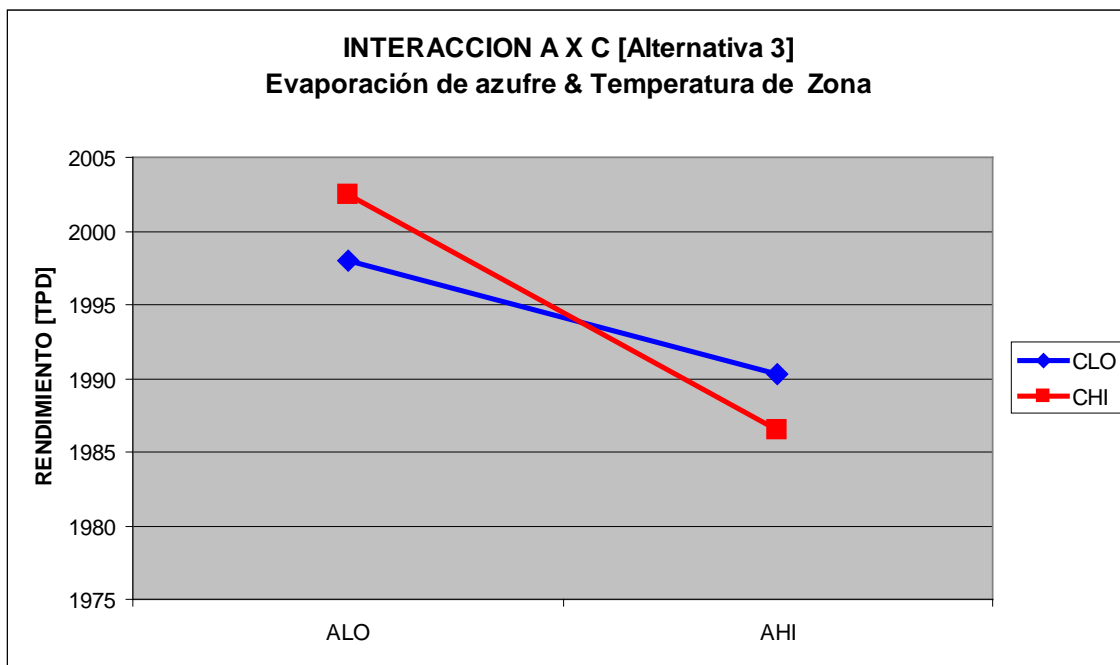


Figura No 48 Gráfica de Interacción A X C Eva & Temp. De Zona Ck, Diseño de Experimentos Alternativa No 3

La figura No 48, nos muestra el Efecto A X C, que es la interacción, entre el Factor A, que es la Evaporación del azufre y el Efecto C, que es la Temperatura de la zona de clinkerización, de la alternativa 3, planteado en los dos niveles, ALO, y AHI, del Efecto A, así como el nivel bajo CLO, y el nivel alto CHI, del Efecto C, contra el rendimiento [TPD], el resultado es:

Cuando el el Efecto A, esta en nivel bajo, ALO y el Efecto C esta en el nivel alto, CHI, el rendimiento de la alimentación al horno, es alto.

A la inversa, cuando el Efecto A, esta en nivel alto, AHI y el Efecto C esta en el nivel alto, CHI, el rendimiento de la alimentación al horno, es bajo.

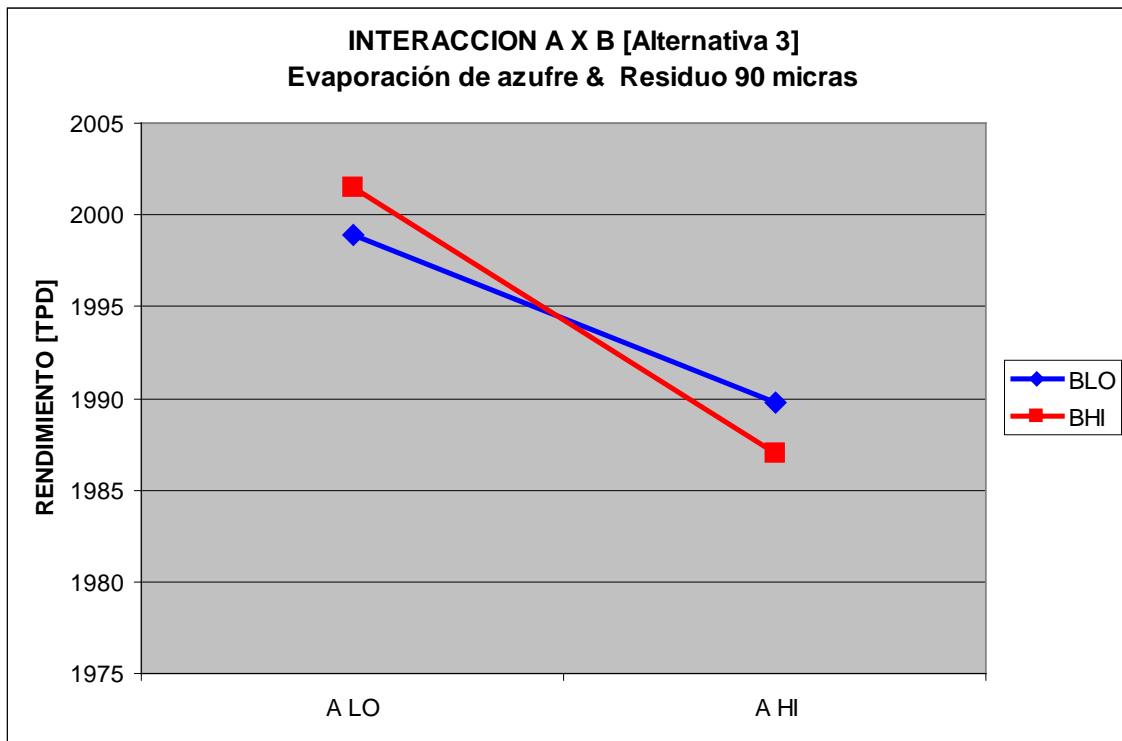


Figura No 49 Gráfica de Interacción A X B, Eva & Residuo 90 micras, Diseño de Experimentos Alternativa No 3

La figura No 49, nos muestra el Efecto A X B, que es la interacción, entre el Factor A, que es el % Evaporación de azufre y el Efecto B, que es el Residuo 90 micras, de la alternativa 3, planteado en los dos niveles, ALO, y AHI, del Efecto B, así como el nivel bajo BLO, y el nivel alto BHI, del Efecto B, en el nivel alto, contra el rendimiento [TPD], el resultado es:

Cuando el el Efecto A, esta en nivel bajo, ALO y el Efecto B esta en el nivel alto, BHI, el rendimiento de la alimentación al horno, es alto.

A la inversa, cuando el Efecto A, esta en nivel alto, AHI y el Efecto B esta en el nivel alto, BHI, el rendimiento de la alimentación al horno, es bajo.

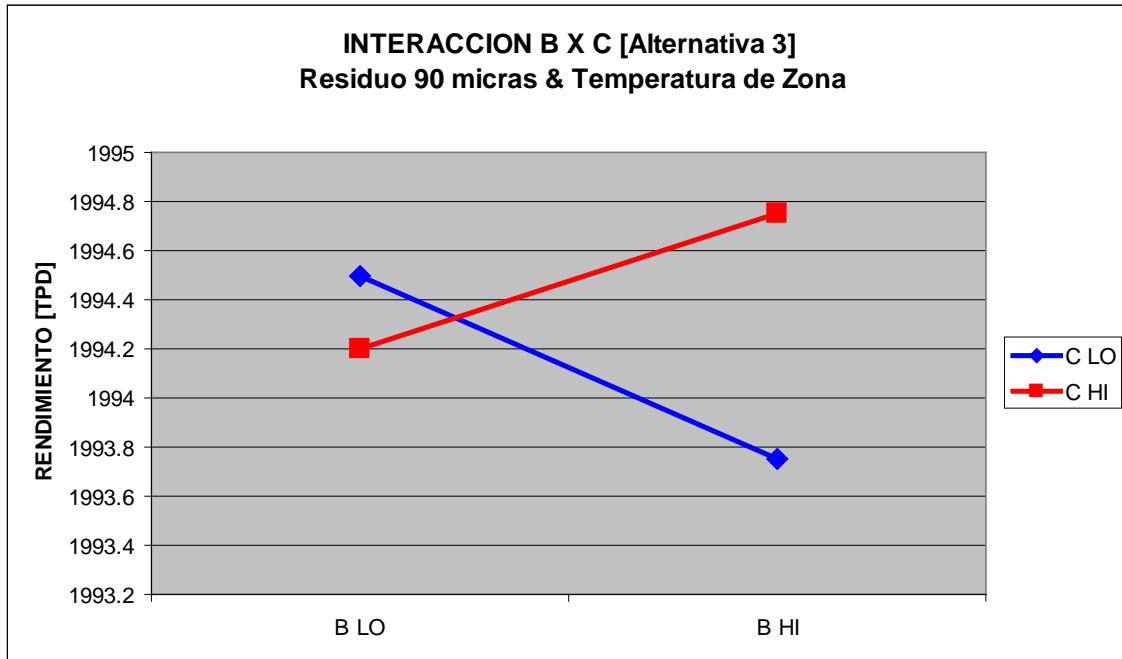


Figura No 50 Gráfica de Interacción B X C, Residuo 90 micras & TBZ, Diseño de Experimentos Alternativa No 3

La figura No 50, nos muestra el Efecto B X C, que es la interacción, entre el Factor B, que es el residuo de 90 micras y el Efecto C, que es Temperatura de la zona de clinkerización, de la alternativa 3, planteado en los dos niveles, BLO, y BHI, del Efecto B, así como el nivel bajo CLO, y el nivel alto CHI, del Efecto C, contra el rendimiento [TPD], el resultado es:

Cuando el el Efecto B, esta en nivel alto, BHI y el Efecto C esta en el nivel alto, CHI, el rendimiento de la alimentación al horno, es alto.

Para la alternativa No 3, El Rendimiento medio fué de 1985.5 TPD, y los valores recomendados para Evaporación 0.7, R_{90} de 19.63% y TBZ de 1250°C.

KOVP	β_0	β_1	KIPV	P
Eva	-0.021	+0.146	SO ₃	0.000
		-0.0028	Al ₂ O ₃	0.971
		-0.0404	Fe ₂ O ₃	0.585
		+0.0252	SiO ₂	0.094

S = 0.0820883 R-Sq = 71.4% R-Sq(adj) = 69.3%

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	4	0.90897	0.22724	33.72	0.000
Residual Error	54	0.36388	0.00674		
Total	58	1.27285			

KOVP	β_0	β_1	KIPV	P
Al ₂ O ₃	+1.64	+0.560	MA	0.000
		+0.0398	CaO	0.000
		-0.000143	ZCK	0.544
		+0.129	K ₂ O	0.012

S = 0.101128 R-Sq = 49.8% R-Sq(adj) = 46.1%

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	4	0.54891	0.13723	13.42	0.000
Residual Error	54	0.55225	0.01023		
Total	58	1.10116			

Tabla No XX Regresión múltiple y ANOVA; EVA [SO₃,Al₂O₃,Fe₂O₃,SiO₂&Al₂O₃ [MA,CaO,ZCK,K₂O]

La Tabla No XX, presenta una ANOVA, de regresión múltiple, donde, la primer sección, nos arroja información acerca de KOVP, por sus siglas en inglés, las variables claves a la salida, EVA, que es la evaporación de azufre, como variable dependiente, y las KIPV, por sus siglas en inglés, son las variables de entrada, y estas son el SO₃, que es la evaporación del azufre en la Etapa I, el contenido de alúmina,

Al₂O₃, el contenido de fierro, Fe₂O₃ y el contenido de sílice, SiO₂. La tabla muestra también, la ordenada al origen así mismo, los coeficientes de cada una de las variables, donde la variable significativa es la del SO₃, sin embargo los fundentes formados por Al₂O₃ y Fe₂O₃, nos muestra que con el control de esos compuestos favorece la reducción de la evaporación del azufre, ayudando con el control de azufre y mejorando la producción del horno. La segunda sección, nos muestra la relación que existe entre el contenido de alúmina, depende de tres variables significativas, que son módulo de alúmina, MA, óxido de calcio, CaO y óxido de potasio, K₂O.

KOVP	β ₀	β ₁	KIPV	P
K ₂ O	+0.0194	+1.51858	AT	0.000
		-1.50263	Na ₂ O	0.000
		-0.00000784	Etapa-1	0.891
		-0.000163	Desc	0.463
S = 0.00422480 R-Sq = 100.0% R-Sq(adj) = 100.0%				

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	4	4.3161	1.0790	60452.96	0.000
Residual Error	54	0.0010	0.0000		
Total	58	4.3170			

Tabla No XXI Regresión múltiple y ANOVA; K₂O [AT, Na₂O, Etapa 1, DesCO₂]

La Tabla No XXI, al igual que la Tabla No XX, contiene los mismos elementos, y nos muestra que la variable dependiente, que es, óxido de potasio, depende de las variables independientes, de las cuales dos son significativas, Alcalis totales, AT, y óxido de sodio, Na₂O.

PRECONTROL EVAPORACION SO ₃ Ck Tipo II			
VARIABLE	LIMITE INFERIOR	LIMITE SUPERIOR	COMENTARIOS
Eva	0.6512	0.7086	
SO ₃	2.136	2.464	Menor es mejor
SiO ₂	20.05	20.36	Menor es mejor
Al ₂ O ₃	5.075	5.124	Mayor es mejor
Fe ₂ O ₃	3.0177	3.082	Mayor es mejor
K ₂ O	1.652	1.76	Mayor es mejor
Na ₂ O	0.2019	0.2137	Menor es mejor
TempEtapaI	844	848	Menor es mejor
Desc	93.0	94.02	Menor es mejor
MA	1.6547	1.6981	Mayor es mejor
ZCK	1297	1321	Menor es mejor

Tabla No XXII Precontrol Evaporación SO₃ Ck Tipo 2

La Tabla No XXII, nos muestra un estadístico, para un precontrol de la evaporación del azufre, describe la variables significativas, así como un rango que nos permite tener los límites superior e inferior.

ENTRADAS	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	S	Alk/SO ₃
Mezcla Cruda [libre de ppi]	0.37	0.6	0.19	0.0	
Carbón mineral	0.16	0	0	0.8	
Llantas	0.02	0	0	1	
Total	0.55	0.6	0.19	1.8	1.37
SALIDAS	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O		
CLINKER	0.67	0.69	0.2		1.26
HARINA CALIENTE [Etapa I]	2.46	1.57	0.23		0.66
Evaporación de Azufre					0.73
Tabla No XXIII Balance de Evaporación SO ₃ Ck Tipo 2					

La Tabla No XXIII, nos muestra un balance de evaporación de azufre, para un clinker tipo 2, donde nos muestra las entradas, que incluye la mezcla cruda, libre de pérdidas, el carbón bituminoso y los combustibles alternos, en este caso la llanta, el análisis químico, de los elementos minoritarios, fueron realizados por fluorescencia de rayos X, mediante espectrómetro cubix XRF Panalitical. Las entradas, nos muestran una relación Alkali/Sulfato, igual a 1.37, ver cálculo de la Tabla No II, de acuerdo al rango óptimo que es de 0.8 a 1.2, esta

fuera del rango superior, lo que significa que tenemos un exceso de álcalis a la entrada del sistema, debido al desequilibrio e inestabilidad operativa el ciclo de evaporación de azufre se acentúa y se convierte en un problema. Un comportamiento parecido en las salidas, solo con la diferencia de que el sistema está desalojando el SO_3 y de que la Evaporación de azufre es mayor a 0.7, calculado mediante ecuación sección 6.2.11, favoreciendo de esta manera la formación y descomposición del sulfato de calcio, CaSO_4 anhidro, el cálculo de la Evaporación de azufre es de 0.73, lo que confirma la formación y descomposición de CaSO_4 , ver Tabla XII Compuestos de azufre en el sistema del horno.

ENTRADAS	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	S	Alk/SO ₃
Mezcla Cruda [libre de ppi]	0.37	0.6	0.19	0.0	
Carbón mineral	0.16	0	0	0.8	
Llantas	0.02	0	0	1	
Total	0.55	0.6	0.19	1.8	
SALIDAS	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O		
CLINKER	0.74	0.69	0.2		1.14
HARINA CALIENTE [Etapa I]	3.93	1.57	0.23		0.42
Evaporación de Azufre					0.81
Tabla No XXIV Desbalance de Evaporación SO ₃ Ck Tipo 2					

La Tabla No XXIV, nos muestra un balance de evaporación de azufre, para un clinker tipo 2, donde nos muestra las entradas, que incluye la mezcla cruda, libre de pérdidas, el carbón bituminoso y los combustibles alternos, en este caso la llanta, el análisis químico, de los elementos minoritarios, fueron realizados por fluorescencia de rayos X, mediante espectrómetro cubix XRF Panalitica. Las entradas, nos muestran una relación Alkali/Sulfato, igual a 1.37, ver cálculo de la Tabla No II, de acuerdo al rango óptimo que es de 0.8 a 1.2, esta fuera del rango superior, lo que significa que tenemos un exceso de álcalis a la entrada del sistema, debido al desequilibrio e inestabilidad

operativa el ciclo de evaporación de azufre se acentua y se convierte en un problema. Un comportamiento parecido en las salidas, solo con la diferencia de que el sistema esta desalojando el SO_3 y de que la Evaporación de azufre es mayor a 0.81, calculado mediante ecuación sección 6.2.11, favoreciendo de esta manera la formación y descomposición del sulfato de calcio, CaSO_4 anhidro, el cálculo de la Evaporación de azufre es de 0.73, lo que confirma la formación y descomposición de CaSO_4 , ver Tabla XII Compuestos de azufre en el sistema del horno.

ENTRADAS	Ton/hora	%Azufre	SO ₃	SO ₃ [tph]	%SO ₃
Carbón quemador principal	4.4	0.8	2.0	0.088	13.24
Carbón quemador calcinador	5.2	0.8	2.0	0.104	15.64
ALTERNOS					
Llantas	0.992	1.0	2.5	0.0248	3.73
Otros					
Alimentación	160	0.0	0.28	0.448	67.39
Conversión			0.36	0.6648	
TOTAL					100.0
Tabla No XXV Balance de masa SO ₃ Ck Tipo 2					

La Tabla No XXV, muestra un balance de masa del azufre en clinker tipo 2, si observamos las corrientes de entrada, el SO₃, aportado por el carbón casi el 29%, la alimentación al horno es la cantidad de mayor aporte, de SO₃ en el sistema, que es mayor a 67%, este análisis, nos sugiere, dos líneas de trabajo para minimizar las entradas de SO₃ al sistema.

1. Control de las entradas de las materias primas, de la harina cruda.
2. Disminuir y controlar el SO₃, en el carbón.

ENTRADAS	Ton/hora	%Azufre	SO ₃	SO ₃ [tph]	%SO ₃
Carbón quemador principal	4.4	0.6	1.5	0.066	9.93
Carbón quemador calcinador	5.2	0.6	1.5	0.078	11.73
ALTERNOS					
Llantas	0.992	1.0	2.5	0.0248	3.73
Otros					
Alimentación	160	0.0	0.31	0.496	74.61
Conversión			0.36	0.6648	
TOTAL					100.0
Tabla No XXVI Balance de masa reducción de SO ₃ Ck Tipo 2					

La Tabla No XXVI, al controlar el contenido de SO₃ en el carbón de 0.8 a 0.6, nos dará las siguientes ventajas:

1. Incrementar nuestro contenido de SO₃ en la alimentación al horno de 0.28 a 0.31, y reduciendo el 0.8 a 0.6, de SO₃ en el carbón.
2. Se podrían utilizar materias primas con mayor contenido de SO₃.

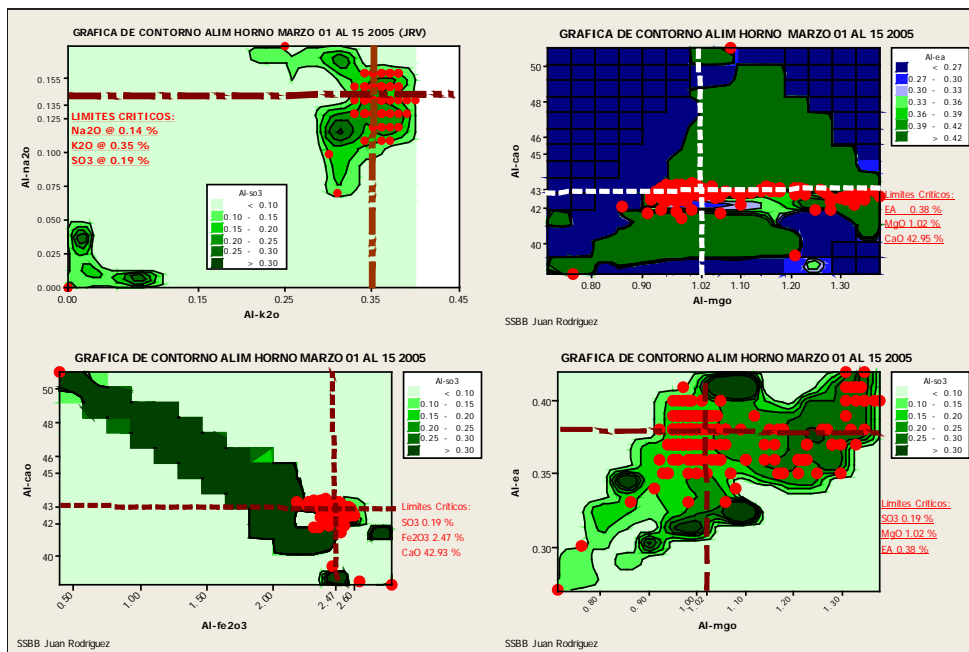


Figura No 51 Gráfica de Contorno de tres dimensiones para límites críticos compuestos minoritarios

En la figura No. 51 se muestra el análisis de verificación, a través de un gráfico de contorno de tres dimensiones, donde se definen los límites críticos y las tolerancias posterior al establecimiento de nuevos parámetros de control en las variables, contenido de azufre en la etapa I, SO₃ y contenido de alcalis totales, EA, que son significativas en el control de encostramiento de la cámara de humos y área del calcinador, por efecto de la evaporación del azufre, en el sistema. Se muestran los límites críticos.



Las Figuras No 52 y 53, nos muestran los combustibles alternos que se han estado utilizando, hasta la fecha, donde podemos observar bandas de transporte, bandas de trasmisión y hule, impregnados, huarache, bolsas de hule, madera plásticos, uretanos, entre otros.

Combustibles alternos	
Llantas Automóvil y camión:	Valor calorífico: 22,000 a 40,000 KJ/Kg Contenido cenizas: 0.0% Azufre: 0 a 1% Cloro: 0.2 a 1% Hierro: 15 a 18%
Plásticos:	Valor calorífico: 28,000 a 32,000 KJ/Kg Contenido cenizas: 22 a 25% Azufre: 1 a 3% Cloro: 0.0 a 1%
Papel y cartón:	Valor calorífico: ~15,000 KJ/Kg Contenido cenizas: ~ 1%
Mezcla de aserrin:	Valor calorífico: 10,000 a 12,000 KJ/Kg Contenido agua: 5 a 25% Normalmente, es usado como vehículo, para otros alternos, solventes, lodos, plásticos, etc.
Aceite usado:	Valor calorífico: 30,000 a 40,000 KJ/Kg Contenido agua: 0 a 10%
Tabla No XXVII Propiedades típicas de combustibles alternos	

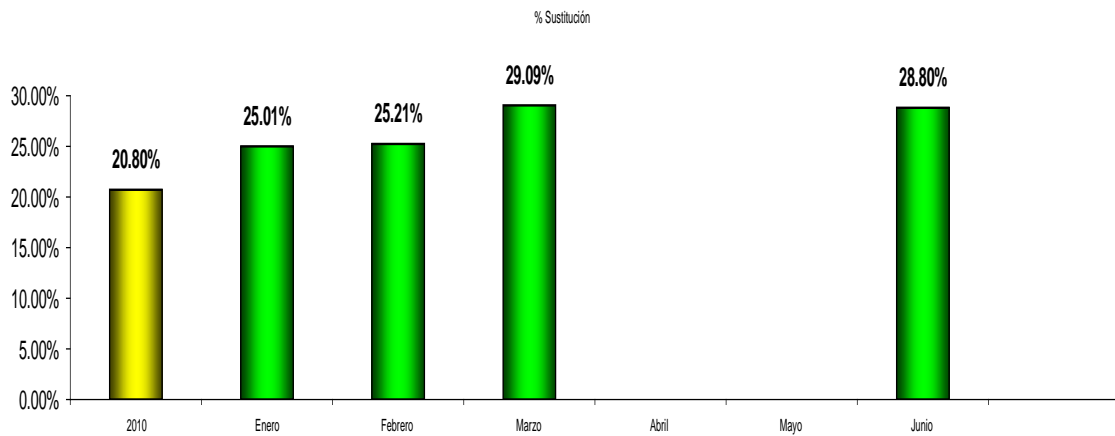


Figura No 54 Gráfica de barras, Sustitución de combustible primario por combustible alterno

En la figura No 54, se muestra la gráfica de barras, el acumulado 2010, y lo acumulado del 2011, la gráfica de barras muestra la sustitución de combustible primario, por combustible alterno (incluye llanta entera, llanta triturada, cáscara de nuez, impregnados con aceite, uretanos, aserrin, entre otros). Los meses de abril y mayo, el horno estuvo parado por alto inventario de clinker.

VIII. CONCLUSIONES:

Residuos combustibles, provenientes de diferentes procesos industriales, son actualmente usados en la producción de clinker de cemento, con la intención de aprovechar su energía residual, reducir costos de producción y/o estabilizar sustancias peligrosas, que afecten ecológicamente nuestro entorno.

Se analizó y se evaluó, la problemática de la baja eficiencia del sistema Calcinador-horno, bajo las condiciones químicas, de los combustibles alternos utilizados. Este trabajo describe un área problema que afecta la eficiencia en la operación de los hornos de cemento. A saber esta área problema, son las pegaduras, en el sistema de Calcinación.

La localización, de las pegaduras, principalmente son en la cámara de humos y ducto ascendente del calcinador. Al tener presencia de las pegaduras, se tienen problemas con una reducción de oxígeno en el sistema, por una disminución de área, esto a su vez esto provoca una alta velocidad de gases, y un menor intercambio de calor, entre los gases y el material, así como pérdida de producción, debido a la inestabilidad en la operación del horno.

Al existir un menor contenido de oxígeno en el sistema, se crean condiciones reductoras, esto hace ineficiente la combustión de los combustibles primarios y también en los combustibles alternos.

Por otro lado, el desbalanceo de la relación álcali-sulfato, así como, la afinidad de los componentes volátiles, favorece el mecanismo, de formación de, sulfato de calcio anhidro, CaSO_4 , que es indeseable en el sistema, ya que al estar en la zona de clinkerización, y debido a su bajo punto de fusión, favorece la evaporación de azufre en el sistema, pero también reacciona con el carbón del combustible inquemado, aumentando la volatilidad del azufre, generando más SO_2 , y más monóxido de carbono, en el sistema.

Los compuestos que se forman con los sulfatos y los elementos alcalinos, son más estables, poseen un mayor punto de fusión que los sulfatos de calcio, y son extraídos del sistema e integrados en la matriz del clinker, hacia el exterior del sistema horno-precalentador.

Cabe mencionar que la aplicación de la metodología utilizada en este trabajo, tales como ANOM, ANOVA, Run Charts, Gráficas de promedios móviles, varianzas generalizadas, DOE, entre otras, nos ayudó a entender el fenómeno del control operativo del horno en presencia de sustancias volátiles al utilizar combustibles alternos y tomar acciones para minimizar y controlar el impacto, cuando se presentan los fenómenos de circulación.

Se lograron determinar las causas de la problemática del sistema Calcinador-horno, se utilizó la metodología de análisis, mediante un diseño de experimentos, factorial completo 2^3 , donde en las tres

alternativas, se obtuvieron los resultados mencionados en sección 6.2.15, en el caso de la alternativa No 1, la interacción Evaporación X Descarboxilación, ver figura 36, 37 y 38; En el caso de la alternativa No 2, la interacción Evaporación X Temperatura calcinador, ver figura 42, 43 y 44; alternativa No 3, la interacción Evaporación X TBZ, ver figura 48, 49 y 50, de la Tabla No XVIII, se encontró que el Efecto Evaporación, la interacción AXB y AXC, fueron significativas, así como una mejora sustancial en la sustitución de combustibles alternos, hasta un 28%.

Se definieron acciones concretas, para evitar la recurrencia.

Establecer precontroles químicos y físicos para la mezcla cruda y material de la etapa uno, comparando con los límites de los elementos circulantes, Tabla X.

Establecer balance de masa, entradas y salidas de los elementos circulantes y comparar contra las entradas típicas de materias primas y combustibles.

Monitorear y controlar el factor de evaporación del SO_3 . El factor de evaporación del SO_3 se incrementa en función de que disminuye el tamaño de partícula del clínker. Asegurar el balance en la relación molar alcali/azufre, entre 0.8 y 1.2, así como el factor de evaporación menor o igual a 0.7.

Mejorar los módulos y factores químicos de la mezcla cruda, para formar un clinker con una nodulación mas homogénea y consistente (nódulos mayores $\frac{3}{4}$ pulgada).

Módulo de Sílice entre 2.40 +/- 0.05

Módulo de Alúmina entre 1.25 +/- 0.05

Establecer limpiezas inteligentes en tubo ascendente del calcinador, así como en la cámara de humos. Eliminando la acumulación de material al menos una vez por turno; Mantener en operación óptima la operación de cañones de aire; Colocar registros para revisión en forma estratégica, para llevar a cabo limpiezas periódicas.

Proporcionar cantidades apropiadas de oxígeno a la entrada al horno (mayor a 2%), evitar condiciones reductoras, para minimizar, reducir o controlar la volatilidad del azufre.

Finalmente podemos mencionar que existe tecnología que ayuda a eliminar la problemática de las pegaduras en los sistemas Horno-Calcinador.

A continuación, se muestran algunas técnicas para reducir el emisiones de SO_2 , con eficiencias que van de 0 a 95%, cada reducción necesita, precondiciones antes de ser aplicadas, algunas pueden utilizarse en los sistemas existentes, sin embargo en algunos casos se necesita una inversión inicial, así como costos de mantenimiento.

De acuerdo a BAT, Best Available Technique, por sus siglas en inglés, algunas de ellas son:

1. Reduction of Sulfur contents in fuels and Kiln Feed (RSC).
2. Optimization of the Clinker Burning Process (OCBP).
3. Addition of Slaked Lime to the Kiln Feed of Preheater Kilns (SLKF).
4. Circulating Fluidized Bed Absorber (CFBA).
5. Wet Scrubber (WS).
6. Adsorption on Activated Coke, POLIVITEC (RSC).
7. Selective Catalytic Reduction (SCR).
8. Utilization of By pass Kiln dust.

IX. LITERATURA CITADA

- 1.0 Bauer, W. G. 1954, "How to control heat for calciners". Chemical Engineering, May 1954, pp. 193-200.
- 2.0 Blaine y Sprung, "Elementos trazas", 1965-1988."Papel de los elementos químicos en la fabricación y uso del cemento". Boletín de investigación y desarrollo RD109T, ACP pp. 9.
- 3.0 Blumenthal Michel, The use scrap Tires in cement rotary kiln. noviembre 1992. pp. 5-18.
- 4.0 Bogue, "La química del Cemento Portland". Dossat, 1952.
- 5.0 Bonn, W. and Lang, T. Brennverfahren. ZKG International. 1986, 39, 105–114.
- 6.0 Bucchi "Fuentes de elementos menores", 1980."Papel de los elementos químicos en la fabricación y uso del cemento". Boletín de investigación y desarrollo RD109T, ACP pp. 10.
- 7.0 Burnham, R.A., A better way to design experiments, Machine Design, April 1996.
- 8.0 Capmas, A, "The French cement industry experience in the use of wastes fuels". V coloquios de Directores y Técnicos de fabricación de cemento, Sevilla, España, pp. 243-252, 2003.
- 9.0 Cembureau 1997, "Alternative fuels in cement manufacture". Technical and environmental review.
- 10.0 Cembureau, Best Control technique for the cement industry; The European Cement Association: Brussels, Belgium, December 1999.
- 11.0 Cembureau 2000, "Best available technique for the cement industry".
- 12.0 Cembureau 2009, Sustainable cement production: "Coprocesing of alternative fuel and raw materials in the cement industry".
- 13.0 Choi, G. and Glasser, F.P. The Sulphur Cycle in Cement Kilns: Vapour Pressures and Solid-Phase Stability of the Sulphate Phases. Cement and Concrete Research.1988, 18, 367–374.
- 14.0 Davis P. Design and Experience with Bypasses for Chloride, Sulfate and Alkalis. Intenational Cement Seminar Proceedings, 1981; pp. 25-30.

- 15.0 Dover, P. Practical Solutions to Kiln and Preheater Build-Up Problems. Proceedings Cemtech, Lisbon, Portugal, 2003; pp. 121–131.
- 16.0 Fortsch, David S, IEEE-IAS Cement Industry committee. "The effect of excess sulfur on clinker properties".
- 17.0 FLSmidth Institute, Kiln Operation and Optimization, Global service training. Febrero 2004. pp. 5-14.
- 18.0 Graham Sprigg, IMS & Howard Klee, World Business Council for sustainable development. International Cement Review. April 2002. 68-70.
- 19.0 Gronwall Fred, Optimization of burner Kiln 7. Enero 2011. pp. 11-15.
- 20.0 Haug, N., Dr. Ing.; Sauter, G., Dipl. Ing.; Samant, G., Dr. Ing., „New development of Hig Dust-SCR Technology in the Cement Industry Result of Pilot Tests in Solnhofen and Development State of a Full Scale SCR Unit“, in Proceedings of the Paris NOx/N₂O Conference, March 21-22, 2001.
- 21.0 Hills, Linda M, " The effect of clinker microstructure on grindability", PCA, 1994.
- 22.0 Knofel, D. and Strunge, J., "Influence of alkalis and sulfur on the properties of Portland cement: Part 1", Zement Kalk-Gips, No 3, 1985, pp. 150-158.
- 23.0 Lechtemberg Dirk, Global fuel magazine. "Tunisian cement industry: Waste management and the cement industry". May 2008, 18-19.
- 24.0 Linero, A.A. Trip Report on SCR Experiences at Solnhofer Portland Zementwerke, Cemenleria di Monselice, and ASM Brescia Waste-to-Energy Plant Jun29-Jul 4, 2006. Distributed July 31, 2006.
- 25.0 Miller y Gartner "Elementos menores", 1976-1980."Papel de los elementos químicos en la fabricación y uso del cemento". Boletín de investigación y desarrollo RD109T, ACP pp. 9 2009, 24-26.
- 26.0 Minitab versión 14, 15, "Software de Estadística", 2005-2009.
- 27.0 Muhammad S. Cement kiln system buildups. Intenational Cement Seminar Proceedings, 1981; pp. 110-115.
- 28.0 Montgomery, D.C. Design and Analysis of Experiments, 3rd ed., John Wiley & Sons, Inc, New York, 1991.

- 29.0 Morten Kyhnau Hansen FLSmidth Alternative Fuels, Denmark, Possibilities for the use of alternative fuels in the cement industry. Global fuels magazine. May 2008, 29-32
- 30.0 Nievoll, J. and Monsberger, G. The performance of specially impregnated alúmina bricks. RHI Bulletin. 2004, 2, 11–14.
- 31.0 Osbaeck, B., "The influence of alkalis on the strength properties of Portland cement", Zement Kalk-Gips, No 2, 1979, pp. 72-77.
- 32.0 Palmer, G. Ring formations in cement kilns. World Cement. 1990, December, 538–543
- 33.0 Rohmehlkomponenten und Klinkerbestandteilen. ZKG International. 1987, 40, 430–433.
- 34.0 Rompps Chemie-Lexikon "Elementos primarios", 1987. "Papel de los elementos químicos en la fabricación y uso del cemento" Boletín de investigación y desarrollo RD109T, ACP pp. 7.
- 35.0 Runke, P., Design of Experiments Software Saves Kodak Thousands, Metal Forming, April 1996.
- 36.0 Sprung, S., "Influence of process technology on cement properties", Research Institute of the Cement Industry, Zement-Kalk-Gips, No 10, 1985, pp. 577-585.
- 37.0 Tening Forton Osric, Characterisation of rotary kiln residues from the pyrolysis of shredder wastes, pp. 3-14.
- 38.0 Trezza, M., Estructura y Propiedades de Clinkers de cemento Portland obtenidos con combustibles residuales, Abril 2009. pp. 5-12.
- 39.0 Von Seebach Michel, Comparison of Bypass effectiveness between Pyroprocessing System with and without Precalciner. Intenational Cement Seminar Proceedings, 1981; pp. 31-34.
- 40.0 Algunas de las referencias son documentos internos, experiencias personales, las cuales no estan incluidas, en este trabajo