

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE
GUATEMALA
Facultad de Ingeniería

Efecto de la velocidad de operación de un horno de
cemento sobre el consumo energético y la estabilidad
de operación

José Rodolfo Aguilar Vela

Guatemala
2007

Efecto de la velocidad de operación de un horno de cemento sobre el consumo energético y la estabilidad de operación

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE
GUATEMALA
Facultad de Ingeniería

Efecto de la velocidad de operación de un horno de
cemento sobre el consumo energético y la estabilidad
de operación

Trabajo de investigación presentado por José Rodolfo Aguilar Vela
para optar al grado académico de Licenciado en
Ingeniería Química

Guatemala
2007


Vo. Bo.:

(f) 
Ing. Rolando Arocha

Tribunal Examinador:

(f) 
Ing. Gamaliel Zambrano

(f) 
Ing. Julio Paredes

(f) 
Ing. Rolando Arocha

Fecha de aprobación: Guatemala 30 de julio del 2007

Agradezco ante todo a Dios por todas sus bendiciones, a mis padres por su apoyo incondicional y al Ing. Rolando Arocha por su invaluable ayuda.

ÍNDICE

Prefacio	vi
Lista de cuadros	viii
Lista de gráficos	ix
Resumen	x
Abstract	xi
Capítulos	
I. Introducción	1
II. Antecedentes	2
A. Cemento Pórtland: Definición y clasificación	2
B. Proceso de producción de cemento y equipo utilizado	3
a. Vía seca	3
b. Vía húmeda	5
C. Composición del clínker	6
D. Horno rotativo	7
1. Relación alimentación/velocidad	8
III. Justificación	10
IV. Objetivos	11
A. Objetivo general	11
B. Objetivos específicos	11
V. Problema a resolver	12
VI. Metodología	13
VII. Resultados	14
VIII. Discusión	17
IX. Conclusiones	19
X. Recomendaciones	20
XI. Bibliografía	21
XII. Apéndice	22
A. Glosario	22
B. Datos obtenidos	24

Lista de cuadros

Cuadro 1: Limitaciones químicas y especificaciones del cemento Pórtland	3
Cuadro 2: Datos obtenidos (Porcentajes)	24

Lista de gráficos

Gráfica 1: Correlación entre consumo calorífico y relación de alimentación/velocidad	15
Gráfica 2: Correlación entre consumo calorífico y velocidad de rotación del horno	15
Gráfica 3: Correlación entre contenido de SO ₃ en harina caliente y relación alimentación/velocidad	16
Gráfica 4: Correlación entre contenido SO ₃ en el clínker y relación alimentación/velocidad	16
Gráfica 5: Correlación entre contenido de O ₂ en gases del horno y relación alimentación/velocidad	17

RESUMEN

El siguiente trabajo surge a partir de la idea de minimizar el consumo energético de un horno de clínker de manera operacional, por lo que se determinó el efecto de la variación de la velocidad de rotación de un honro de clínker, a una alimentación constante, sobre el consumo energético y la estabilidad de operación del mismo. Los resultados obtenidos fueron favorables ya que se observó una disminución en el consumo de energía a medida que la relación se fue acercando a uno, obteniéndose el mejor resultado con la relación alimentación/velocidad de 1.019. Con esta relación también se obtuvieron los mejores resultados en cuanto a estabilidad de operación, ya que se lograron disminuir los niveles de SO_2 en los gases de salida y se aumentó el contenido de SO_3 en el clínker.

ABSTRACT

The following work arises out of the idea of minimizing energy consumption in a clinker kiln just by changing operating parameters, so the effect of the feed rate/velocity relation of a clinker kiln on its energy consumption and operation stability was determined, where only the rotation speed of the kiln suffered any changes maintaining the feed rate constant at its maximum value. Positive results were obtained, since an energy consumption decrease was observed as the feed rate/velocity relation tended to be one, obtaining the best results when the relation was 1.019. This relation also provided the best results as far as kiln operation is regarded, since SO_2 levels in exit gases were reduced, and SO_3 content increased in the clinker.

I. INTRODUCCIÓN

La industria del cemento es una de las industrias con mayor consumo energético, tanto térmico como eléctrico. Debido a lo anterior y al incremento en los precios de los combustibles tradicionales durante los últimos años, dicha industria se ha visto forzada a optimizar sus recursos con el objeto de disminuir el consumo energía por unidad de producción, así como a utilizar combustibles más económicos. A mediados del siglo pasado era común encontrar hornos operando en vía húmeda los cuales consumían alrededor de 10,500 Mega Julios (MJ) por cada tonelada de clínker producida; en la actualidad se encuentran en la industria instalaciones operando en vía seca que consumen cerca de 2,900 MJ por tonelada de clínker lo que representa una disminución del 70% en el consumo de energía térmica; el calor teórico de formación del clínker es de aproximadamente 1,800 MJ por tonelada. Cabe mencionar que la inversión necesaria para convertir una planta operando en vía húmeda a vía seca es significativamente elevada por lo que, en la actualidad, aún existen las primeras y la transformación hacia procesos vía seca ha sido lenta. En cuanto al costo de los combustibles se ha observado que desde 1,998 a la fecha, el precio del Fuel Oil N° 6 (Bunker "C") se ha incrementado en un 150% aproximadamente. La mayoría de las plantas han modificado sus instalaciones con el objeto de poder utilizar coque de petróleo, carbón mineral, combustibles alternativos, etc., para contrarrestar el impacto económico y así mantener competitividad sin afectar la calidad del producto. No obstante estos cambios pueden afectar negativamente el rendimiento del proceso al extremo de provocar paros en el horno con las consiguientes pérdidas de producción. Estos problemas se deben principalmente al hecho de que estos combustibles tienen altos contenidos de azufre que si no se controlan adecuadamente durante la combustión pueden provocar acumulamientos de material en algunas partes del equipo.

En este trabajo se realizaron una serie de pruebas en un horno rotativo para clínker con el objeto de determinar si existe alguna relación entre el grado de llenado del horno y el consumo térmico en el mismo; también se evaluó algunos otros parámetros de operación. El procedimiento que se utilizó para variar el grado de llenado fue mantener fija la cantidad de harina cruda alimentada al horno y variar únicamente la velocidad de rotación del mismo. Se analizaron cinco escenarios diferentes, variando la relación alimentación / velocidad del horno desde 1.019 hasta 1.091.

Para evaluar cada uno de los escenarios arriba mencionados se verificó el consumo de energía térmica del horno así como su estabilidad en la operación y la calidad del producto. Para determinar el consumo de energía se utilizó como base el consumo de combustible por cada hora de operación. Para determinar la estabilidad en la operación, se monitorearon los distintos componentes de los gases de combustión en la entrada al horno. Para determinar la calidad del producto se realizaron análisis químicos a los distintos materiales.

II. ANTECEDENTES

A. Cemento Pórtland: Definición y clasificación

El cemento Pórtland es una clase perteneciente a los cementos hidráulicos cuyos principales componentes son dos silicatos de calcio: $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ y $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$. La alúmina y el hierro de las materias primas forman principalmente $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ y una composición sólida con características de un líquido subenfriado (vidrio) con fórmula $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$; además hay otras impurezas en pequeñas cantidades. El cemento Pórtland se fabrica calentando una mezcla de material calcáreo y otro material arcilloso, hasta su fusión parcial. El material que resulta de la fusión de todas las materias primas arriba mencionadas se llama clínker el cual al pulverizarlo y, con adición de yeso forma el cemento Pórtland. En ocasiones se agregan pequeñas proporciones de otras sustancias durante la pulverización para dar al producto determinadas características.

Existen cinco clases de cementos Pórtland. El tipo I es para construcciones de hormigón en que no se requieren las propiedades especiales que poseen los otros tipos. El tipo II o de endurecimiento con calor moderado de hidratación es para construcciones masivas de hormigón expuestas a moderada acción de sulfatos. El tipo III o cemento de alta resistencia inicial, es para aquellos casos en que se requiere alta resistencia en corto tiempo. El tipo IV o cemento de bajo calor de hidratación, al igual que el tipo II se utiliza en obras masivas cuando se dificulta el curado del hormigón. El tipo V o cemento resistente al ataque de sulfatos se usa principalmente en obras cercanas al agua de mar. Cuando a cualquiera de los cementos mencionados anteriormente se les adiciona un agente que puede incorporar aire, al cemento resultante se le designa tipo IA, tipo IIA, etc. (Labahn, 1983)

Tabla 1: Limitaciones químicas en las especificaciones del cemento Pórtland

	Tipo de cemento				
	I	II	III	IV	V
Oxido Magnésico (MgO), máx. %	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0
Trióxido de Azufre (SO_3), máx. %					
Cuando $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ es 8% o menos	3.0	3.0	3.5	2.3	2.3
Cuando $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ más de 8%	3.5	-	4.5	-	-
Péridas por calcinación, máx. %	3.0	3.0	3.0	2.5	3.0
Residuo insoluble, máx. %	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
Sílice (SiO_2), mín. %	-	20.0	-	-	-
Alúmina (Al_2O_3), máx. %	-	6.0	-	-	-
Oxido Férrico (Fe_2O_3), máx. %	-	6.0	-	6.5	-
Silicato Tricálcico ($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$), máx. %	-	-	-	35.0	-
Silicato Dicálcico ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$), máx. %	-	-	-	40.0	-
Alumniato Tricálcico ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$), máx. %	-	8.0	15.0	7.0	5.0

(ASTM International Standard 2003; C150 – 02 a.)

B. Proceso de producción de cemento y equipo utilizado

1. Vía seca. Los materiales utilizados en la producción de cemento Pórtland son materiales calcáreos, compuestos principalmente por CaCO_3 y MgCO_3 ; materiales arcillosos con contenidos de SiO_2 , Al_2O_3 y Fe_2O_3 . La obtención de estos materiales se hace por medio de explotación de canteras donde se utilizan explosivos y tractores para extraer de la montaña los materiales del tamaño adecuado. De estas canteras se extraen piedras de hasta un 1m^3 de tamaño. Debido a que el tamaño del material es bastante grande, se utilizan cargadores frontales para moverlo y camiones de acarreo para transportarlo. (Peray, 1979)

El siguiente paso en el proceso de producción es la trituración; los camiones de acarreo llevan las piedras de hasta un 1m^3 las que pasan por una trituradora de donde salen de un tamaño máximo de $1\frac{1}{2}$ pulgadas. Los materiales triturados se almacenan en silos separados. Para mover estos materiales hasta los silos se utilizan transportadores mecánicos consistentes en bandas de hule y elevadores de cangilones principalmente.

Posteriormente, por medio de este mismo tipo de bandas, las materias primas son transportadas desde los silos de almacenaje a molinos de bolas o a molinos verticales donde las materias primas son desmenuzadas hasta formar lo que se conoce como harina cruda.

El molino de bolas gira horizontalmente sobre su propio eje por medio de un motor y un reductor y consta de dos o tres cámaras unidas entre sí, dependiendo del diseño del fabricante, de tal forma que una de ellas realiza el secado de materiales y las otras la molienda propiamente dicha. Este movimiento rotatorio hace que las bolas, que están libremente depositadas en su interior, tengan un movimiento de cascada y, al chocar entre sí, muelen los materiales. En la cámara de secado se elimina la humedad de las materias primas por medio de los gases de combustión calientes ($350\text{ }^\circ\text{C}$) provenientes del horno. Inmediatamente después pasan a la cámara de molienda donde hay bolas desde 90mm hasta 35mm . Los gases antes mencionados finalmente salen del circuito por medio de ductos y son filtrados en colectores de polvo para eliminar todo el polvo remanente que puedan tener. El tamaño final de la partícula de esta harina cruda, después del proceso de molienda, es de un $85\% < 90\text{ }\mu\text{m}$. En el circuito de molienda es necesario subir la harina cruda para el proceso de separación de las partículas gruesas de las finas, dicha elevación se hace por medio de elevadores mecánicos de cangilones que constan básicamente de poleas motriz y tensora, banda de hule o cadenas, a las cuales van sujetos los cangilones. (Ghosh, 1991)

La harina cruda que sale del molino es muy fina por lo que ya no es adecuado usar bandas de hule para transportarlo; para este fin se utilizan deslizadores de aire los cuales constan de una cámara de aire y otra de material, ambas están confinadas por cajas de hierro y separadas entre sí por medio de lona permeable. El

criterio de transporte es que el polvo cae, por un extremo, a la cámara de polvo (parte superior del transportador) y, por debajo en ese mismo extremo, entra alto caudal de aire que pasa a través de la lona y desliza el material hacia el otro extremo del deslizador. El deslizador tiene una inclinación de 6 a 8 ° para facilitar que la harina cruda se mueva.

Estos deslizadores transportan la harina cruda hacia un silo de homogeneización. En el piso del silo hay deslizadores más pequeños y sólo con cámara de aire y lona, su función es inyectar aire por la parte inferior del silo para provocar movimiento vertical de la harina cruda y, de esa forma homogeneizarla en cuanto a composición química y granulometría. Para transportar la harina cruda hacia el horno se utilizan transportadores mecánicos o transportadores neumáticos, los primeros son los más comunes debido a que consumen menos energía.

Esta harina cruda pasa por una torre de precalentamiento antes de entrar al horno. La torre está compuesta por varios ciclones en donde se aprovechan los gases del horno para calentar dicha materia prima y, al mismo tiempo, se obtiene el beneficio de enfriar los gases lo cual es indispensable para su manejo posterior. Los gases salen del horno a aproximadamente 1,000 °C y, luego de pasar por la torre de precalentamiento, su temperatura baja a aproximadamente 350 °C. La harina cruda va cayendo por gravedad y pasa por cada uno de los ciclones (normalmente cuatro y hasta cinco en algunos casos) donde se pone en contacto con los gases de combustión, hasta llegar al horno. En este proceso, que dura aproximadamente 1 minuto desde la parte alta de los ciclones hasta la entrada al horno, la harina cruda se calienta a 850 °C. Al entrar al horno el material se sigue calentando y empiezan a suceder reacciones químicas en fase sólida donde se forman los siguientes compuestos: $(\text{CaO})_2\text{SiO}_2 + \text{CaO} + \text{SiO}_2 + \text{CO}_2$, cuando el material alcanza la temperatura de 1,200 °C se empiezan a formar principalmente los siguientes compuestos $(\text{CaO})_3\text{SiO}_2 + (\text{CaO})_2\text{SiO}_2 + (\text{CaO})_3\text{Al}_2\text{O}_3$, que son los responsables de la actividad hidráulica o resistencia a la compresión que desarrollará el cemento producido. El compuesto principal para el desarrollo de dicha actividad hidráulica es el $(\text{CaO})_3\text{SiO}_2$ que los fabricantes de cemento definen como C_3S en forma abreviada; este compuesto es muy inestable por lo que se debe enfriar rápidamente para mantener su estructura dentro de la matriz del clinker. Si no se enfría rápido el C_3S regresa a ser $(\text{CaO})_2\text{SiO}_2$ lo cual va en detrimento del desarrollo de actividad hidráulica del cemento. La temperatura dentro del horno, en la parte más caliente es de aproximadamente 1,500 °C – 1,800 °C. Esta temperatura se alcanza por medio de la oxidación de distintos combustibles que por lo general son bunker, gas natural, carbón mineral o coque de petróleo. Para enfriar el nuevo producto formado, clinker, se usa el aire proveniente del enfriador de parrillas o de satélites. Dichos enfriadores bajan la temperatura del clinker de 1,000°C a 120°C en el caso de los de parrilla y a 200°C en el caso de los de satélites. Por un extremo de dicho enfriador ingresa el clinker caliente y, por el otro, aire a temperatura ambiente (30 °C). Dicho aire se calienta hasta unos 950 °C al momento de entrar al horno y se utiliza como aire secundario en la combustión. Normalmente el clinker consta de piedras esféricas de diámetro entre 1½ y ¼ pulgadas.

Durante el proceso de clinkerización dentro del horno se libera azufre, la mayoría proveniente del combustible utilizado; el azufre liberado viaja a través del horno junto con los demás gases de combustión. En algunas partes del horno existe flujo contracorriente por lo que dichos gases se ponen en contacto con la harina provocando la transferencia de materiales en la que el azufre (SO_2) migra hacia la harina cruda, mezclándose con el óxido de calcio (CaO) y formando CaSO_4 . El objetivo principal durante la combustión es evitar la recirculación de este azufre dentro del horno, y se saca del mismo en forma de sulfatos alcalinos en el clinker, ya que en caso contrario, provoca la formación de anillos en el horno mismo y pegaduras en la torre de precalentamiento.

Al salir del horno el clinker es transportado por medio de transportadores de bandejas metálicas debido a su alta temperatura. En bandas de hule no se pueden transportar materiales con temperaturas mayores a $120\text{ }^\circ\text{C}$. Estos transportadoras llevan el clinker a otro silo de almacenaje. (Ghosh, 1991)

Al enfriarse el clinker se alimenta a molinos de bolas o vertical de rodillos, similares a los de materias primas. La proporción de los distintos materiales, incluyendo el clinker, se mantienen por medio de bandas pesadoras que hay debajo de cada silo de almacenamiento. Para transportar estos materiales al molino de cemento se utilizan transportadores mecánicos. Dicho molino, a diferencia del de harina cruda, no usa los gases calientes provenientes del horno sino que usa aire a temperatura ambiente para enfriar los internos del molino ya que el clinker llega a aproximadamente $100\text{ }^\circ\text{C}$. Al salir del molino el producto en proceso pasa por otro elevador de cangilones el cual lo lleva a un separador en el que se separan las partículas gruesas de las finas por medio de aire y por medio de las fuerzas centrífuga, centrípeta y de la gravedad. Las partículas gruesas caen de regreso en el molino y las finas constituyen el producto final: cemento. Luego por medio de deslizadores es transportado a los silos de almacenaje para su posterior envasado. El tamaño de la partícula de cemento que sale del molino puede variar desde 85% a $95\% < 45\text{ }\mu\text{m}$.

El último proceso es el envasado del cemento el cual se hace por medio de envasadoras rotatorias. Dependiendo del mercado se pueden utilizar bolsas de papel o de polipropileno con capacidades desde 25 hasta 50 kilogramos, las cuales se llenan en un proceso continuo. Dichas bolsas son transportadas a los camiones de despacho por medio de bandas de hule similares a las mencionadas anteriormente sólo que en este caso son planas.

2. **Vía húmeda.** El proceso vía húmeda fue el más importante en el pasado. Canteras heterogéneas y adiciones correctivas no eran problema, ya que la materia prima se mezclaba con agua para formar una pasta. Esta pasta se llevaba a un tanque donde se mantenía en constante movimiento y manteniendo así una homogeneidad muy buena. La molienda se llevaba a cabo en molinos de mezcla los cuales consumían un 30% menos de energía que los molinos de bolas pero tenían un mayor desgaste de superficie interna. La

desventaja del proceso vía húmeda es el alto consumo energético. Comparado con un horno con torre precalentadora la diferencia es más de 2000 MJ/t de clínker, un 60 % a 70 % por ciento. Hoy en día existe tecnología eficiente de homogenización en seco por lo que el proceso vía húmeda no se aplica en plantas nuevas, ya que la inversión y costos de un sistema vía húmeda son más altos que los de un sistema vía seca equivalente. Otra razón por la cual se utilizaba el proceso vía húmeda era porque permitía la producción de cemento bajo en álcalis ($< 0.6\%$) y los problemas de circulación son más fáciles de controlar en hornos vía húmeda. Pero hoy en día el uso de quemadores secundarios o instalaciones eficientes con un precalcinador son posibilidades que ayudan a mantener estos problemas bajo control.

C. Composición del clínker

Los principales compuestos del clínker son: silicato tricálcico ($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$), silicato dicálcico ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$) una solución sólida que se asemeja a la aluminoferrita tetracálcica ($4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$) y aluminato tricálcico ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$). Estos componentes reciben los nombres de alita ($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$), belita ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$) y celita ($4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$) (Calleja, 2005)

Entre los componentes menores del clínker se encuentran los productos del azufre como el CaSO_4 , K_2SO_4 , y Na_2SO_4 . Dentro del horno estos reaccionan en su mayoría con el azufre proveniente de los combustibles. En principio este azufre está en forma gaseosa como SO_2 proveniente de la combustión, el SO_2 viaja por el horno y entra al calcinador en contracorriente en donde se mezcla con la harina cruda y reingresa al horno en forma sólida como sulfatos alcalinos, K_2SO_4 y Na_2SO_4 , y sulfato de calcio anhidro, CaSO_4 . La mayor parte del azufre es captado en forma de sulfato alcalino y éste se funde y se forma una fase inmisible con la fase donde se encuentra el C_3S y C_2S . Los sulfatos alcalinos, que son los más volátiles, entran en un ciclo de evaporación y condensación dentro del horno. Los sulfatos se evaporan al llegar a la zona de clinkerización dentro del horno y empiezan a viajar con los gases de combustión hacia las zonas más frías donde pierden calor debido a la transferencia de calor entre el gas y los sólidos, llegando a su punto de rocío (entre $700\text{ }^\circ\text{C}$ y $800\text{ }^\circ\text{C}$) por lo que se condensan. Los sulfatos condensados se mezclan con la harina cruda y la vuelven pegajosa, razón por la cual se forman los anillos dentro del horno. Sin embargo, si estos ciclos de evaporación se controlan manteniendo una temperatura adecuada en la zona de clinkerización, estos productos alcalinos logran salir del proceso, incorporados al clínker. (Glasser, 2002)

Todos los cloruros alcalinos se evaporan a temperaturas entre $900\text{ }^\circ\text{C}$ y $1,000\text{ }^\circ\text{C}$ y son transportados con los gases de combustión hacia la torre de precalentadores. El calor de vaporización se utiliza en el horno y se libera de nuevo como calor de condensación en el precalentador o en el calcinador. (Locher, 2005)

D. Horno rotativo

El primer horno rotativo para cemento fue introducido por Frederick Ransome en el año 1885, anteriormente eran hornos verticales de muy baja capacidad de producción comparados a los equipos actuales. Al inicio se utilizaba gas natural como combustible, después también se utilizaron derivados de petróleo como el fuel oil No. 6 y, por último, se introdujo el uso de carbón y coque de petróleo como combustibles. El diseño inicial fue de 1.8 m a 2.0 m de diámetro y entre 20 m y 25 m de largo, con capacidades de 30 a 50 ton de clínker por día.

Existen diferentes tipos de hornos entre los que se pueden mencionar: horno rotatorio sin restricciones en el área seccional a todo lo largo, horno rotatorio con mayor diámetro en el área de combustión, horno rotatorio con mayor área en la zona de calcinación y horno rotatorio con mayor área en la zona de calcinación y combustión. El objetivo de aumentar el área seccional en las partes indicadas anteriormente era para aumentar el tiempo de residencia en esa zona en particular y, al mismo tiempo, disminuir la velocidad de gases. Con esto se mejora la transferencia de calor del gas al material. Desafortunadamente esto causaba que el flujo de material fuera irregular a lo largo del horno, afectando negativamente su operación y rendimiento.

El horno rotatorio de proceso vía seca fue desarrollado en los Estados Unidos. Originalmente estos hornos tenían una longitud entre 140 m y 160 m y no estaban equipados con intercambiadores de calor. Esto causaba que los gases de salida tuvieran una temperatura de 700 °C y 750 °C con el consiguiente problema en su manejo. Posteriormente se empezó a instalar torres de precalentadores ciclónicos con los que, en la actualidad, se logran temperaturas menores a los 380 °C. Con este nuevo diseño se ha logrado incrementar notablemente no sólo la producción de clínker sino también la eficiencia en el consumo energético. (Labahn, 1983)

Los hornos rotatorios en la industria de cemento funcionan bajo el principio de flujo contracorriente. Durante el proceso de clinkerización del horno, la harina caliente que ha sido descarbonatada (calcinada entre el 50 % y más del 90 % dependiendo del tipo de precalentador) pasa a través del tubo del horno en flujo contracorriente con los gases de combustión, calentándose desde unos 800 °C hasta 1,500 °C. Durante esta etapa se dan las transformaciones químicas y mineralógicas necesarias para la formación del clínker. La energía necesaria es proporcionada por la oxidación a temperatura adecuada de los combustibles utilizados. (Locher, 2005)

En el tubo del horno la transferencia de calor a la harina se da de manera directa e indirecta a través de mecanismos de convección, conducción y radiación. El intercambio de calor directo se da entre los gases

de combustión y la harina en primera instancia, también se da un proceso de transferencia de calor indirecta entre el ladrillo refractario que cubre internamente la chapa del horno y la harina. Por lo tanto se dan los procesos de transferencia de calor arriba indicados: de los gases de combustión a la parte superior de la harina y al ladrillo refractario expuesto al paso de dichos gases, por medio de radiación; del ladrillo refractario caliente a la parte superior de la harina por convección y, del ladrillo refractario a la parte inferior de la harina por conducción debido al contacto directo con dicho material refractario. Además se dan pérdidas de calor en las paredes del horno por conducción a través del ladrillo refractario y de la propia chapa metálica del horno, estas pérdidas dependen básicamente del tipo y espesor del revestimiento refractario.

La principal fuente de calor para el proceso proviene de la oxidación de los distintos combustibles; dicha energía se utiliza básicamente para eliminar el agua de cristalización de los materiales, para descarboxar las materias primas tales como CaCO_3 y MgCO_3 , para vaporizar cloruros alcalinos y otros elementos volátiles así como para la formación de las fases cristalinas existentes en el clínker. La formación de $\beta\text{-(CaO)}_2\text{SiO}_2$, de $2\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ y de $\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ son reacciones exotérmicas cuyo calor liberado se utiliza en el horno para satisfacer la demanda de calor de las reacciones endotérmicas antes mencionadas. La longitud de la zona de calcinación y la demanda de calor para este proceso dependen del grado de calcinación a la entrada del horno.

1. Relación alimentación/velocidad. La transferencia de masa y de calor en hornos rotativos para producir clínker depende en gran parte del movimiento de la cama de sólidos dentro del mismo. El movimiento más común es el movimiento en cascada. El transporte de calor en la cama de material sólido en hornos con combustión directa se puede explicar de la siguiente manera: durante el movimiento rotatorio las partículas se calientan en el lado que está en contacto con el gas, por los mecanismos de convección y de radiación. En la parte inferior de la cama las partículas se mezclan con el resto de material caliente de la cama y se calientan además por el contacto con la pared caliente del horno. Durante este proceso las partículas que se han calentado en la parte superior están en constante movimiento hacia el centro de la cama de material. Por esta razón la transferencia de masa y calor en la cama de material se ve altamente influenciada por el tiempo de residencia de las partículas en la cama de material. A medida que se aumenta la velocidad angular del horno se obtiene una mejora en la transferencia de calor, ya que se disminuyen los tiempos de residencia en la superficie de la cama del material y al mismo tiempo se aumenta la frecuencia con la cual el material pasa por la superficie a través del movimiento en cascada; además, la cama de material se vuelve más delgada facilitando el proceso de transferencia de calor hacia el material que está en el centro de la misma y, por lo tanto, se facilita la cocción del clínker. La disminución en el tiempo de residencia es un factor muy importante ya que si se trabaja con hornos que no cuentan con un calcinador antes de la torre de ciclones, el material entra al horno con un 50 % a 80 % de calcinación por lo que el resto debe descarboxarse dentro del horno, exigiendo un tiempo de residencia mayor. Cuando

se trabaja con hornos que cuentan con un calcinador, el material entra con un 95 % a 98 % de material calcinado por lo que la calcinación dentro del horno se da en menor cantidad lo cual permite que el tiempo de residencia pueda disminuirse considerablemente sin provocar problemas en la calidad del clínker, razón por la cual la velocidad de rotación del horno puede ser más elevada. (Liu, 2005)

III. JUSTIFICACIÓN

Los fabricantes de hornos rotativos para la industria del cemento normalmente especifican una relación genérica entre la alimentación y la velocidad de rotación del mismo. Dependiendo de los tipos de horno, de los combustibles usados y de las materias primas existentes dicha relación se puede variar ligeramente y, al hacerlo, es posible afectar positiva o negativamente la operación o la calidad del producto del horno. Este estudio se realizó, como se mencionó anteriormente, con el objetivo de investigar si la relación alimentación/velocidad usada actualmente es la óptima en cuanto a consumo de energía, estabilidad de operación y calidad del producto.

La elaboración del producto del horno llamado clínker es la que consume mayor cantidad de energía térmica, por lo que cualquier ahorro en este proceso es de vital importancia. Por otro lado, si se logra mejorar la estabilidad de operación del horno, se traducirá en más horas de operación al año y, por lo tanto, en mayor producción de clínker. En cuanto a la calidad del mismo, si ésta se mejora será posible obtener mayor uniformidad lo que se convierte en una mayor estabilidad de la calidad del producto final, el cemento.

IV. OBJETIVOS

A. General

1. Determinar la mejor relación alimentación/velocidad en un horno rotativo para la producción de clínker, con torre de intercambio de calor consistente en 5 ciclones y un calcinador, usando como combustible coque de petróleo.

B. Específicos:

1. Determinar la correlación entre el consumo energético y la relación de alimentación/velocidad del horno.
2. Determinar la correlación entre SO_3 del clínker y la relación alimentación/velocidad del horno.
3. Determinar la correlación entre el oxígeno (O_2) de los gases de combustión y la relación de alimentación/velocidad del horno.
4. Determinar la correlación entre la cantidad de SO_3 en la harina cruda entrando al horno y la relación de alimentación/velocidad del horno.

V. PROBLEMA A RESOLVER

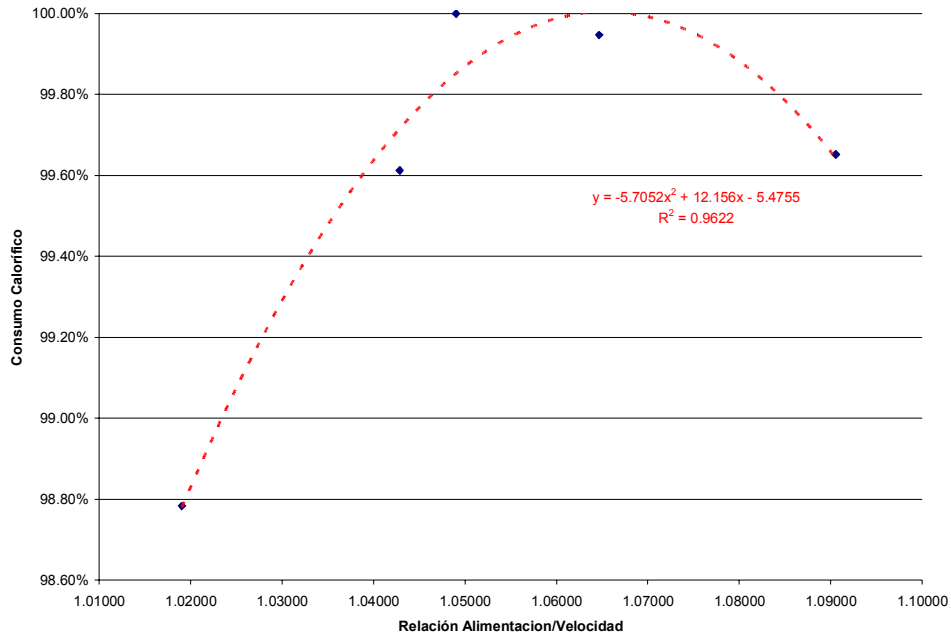
Encontrar el grado de llenado adecuado para un horno de clínker, con el objeto de mejorar el consumo térmico en el mismo.

VI. METODOLOGÍA

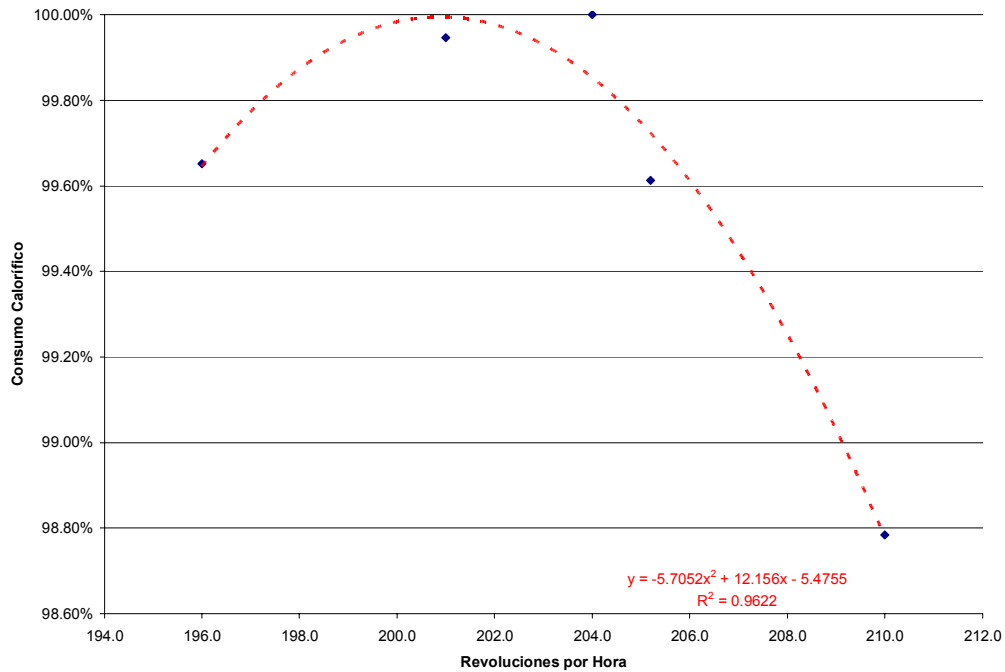
1. Dar seguimiento cada hora, durante todo el proceso, a las siguientes variables de proceso: tiempo de trabajo del horno, alimentación, velocidad de rotación, consumo energético, temperatura de la salida del horno, temperatura de la salida de la torre de ciclones y emisiones de CO₂, SO₂, NO_x, CO en la entrada del horno. Antes de desfazar por primera vez la velocidad actual respecto a la alimentación, se debe dejar registro del estado de las variables arriba mencionadas, durante un período de 24 horas de operación estable del horno como mínimo.
2. Variar la velocidad del horno, a las que se encuentra actualmente, y dejar la alimentación constante.
3. Mantener este desfase de la velocidad respecto a la alimentación por un tiempo de 48 horas.
4. Al transcurrir el tiempo apropiado, volver a aumentar la velocidad del horno y llevar a cabo los pasos antes mencionados de nuevo. Habrá que hacerlo con 5 diferentes relaciones para obtener suficientes datos y así tener una muestra representativa de los cambios.
5. Simultáneamente generar gráficas relacionando la relación alimentación/velocidad del horno contra: consumo de calor, CO, SO₂, NO_x y O₂ en la entrada del horno, con el objetivo de determinar si existe una correlación entre ellos.
6. Hacer el mismo tipo de gráficas de acuerdo a parámetros de calidad.

VII. RESULTADOS

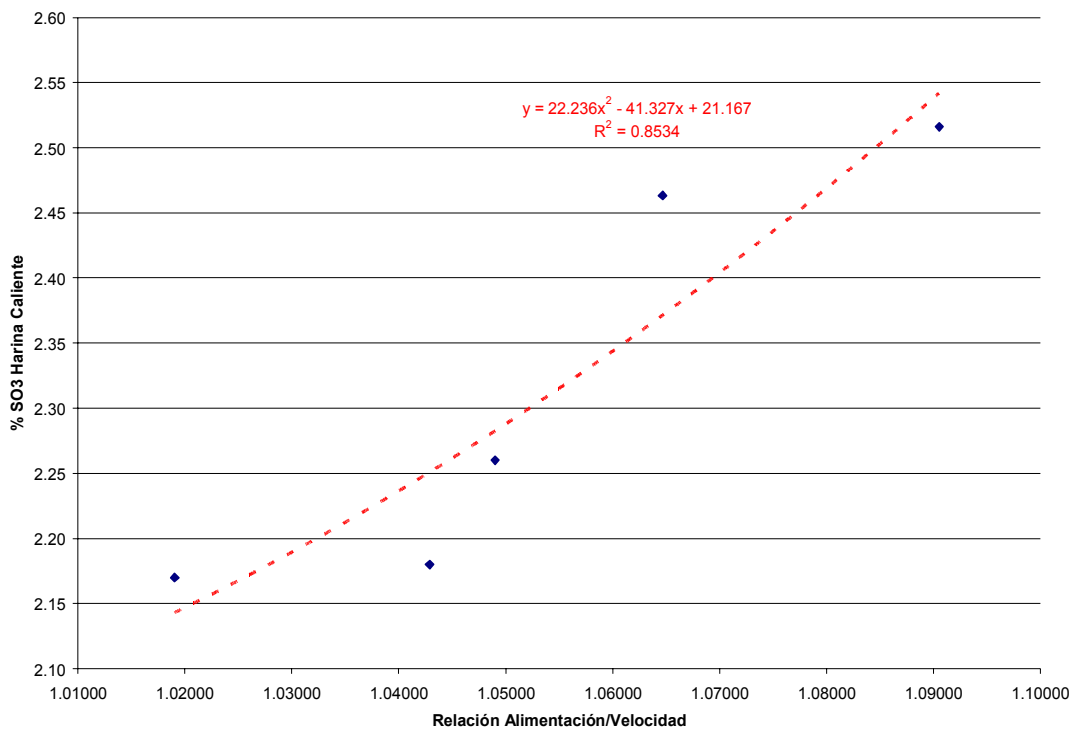
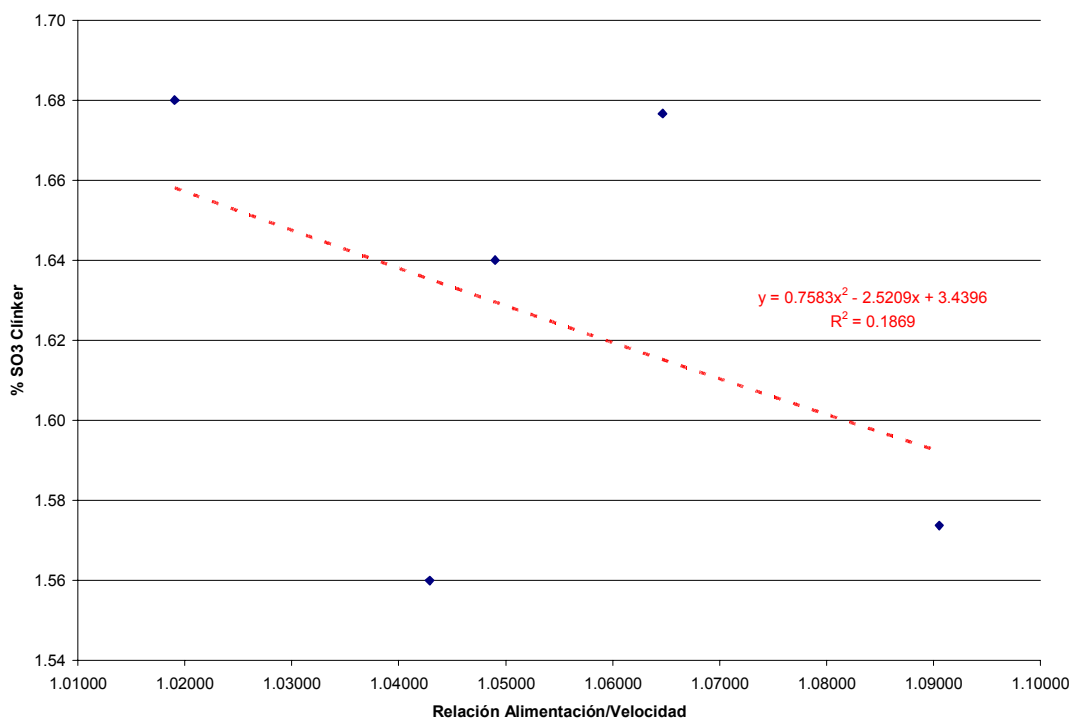
Gráfica 1: Correlación entre consumo calorífico y relación de alimentación/velocidad¹

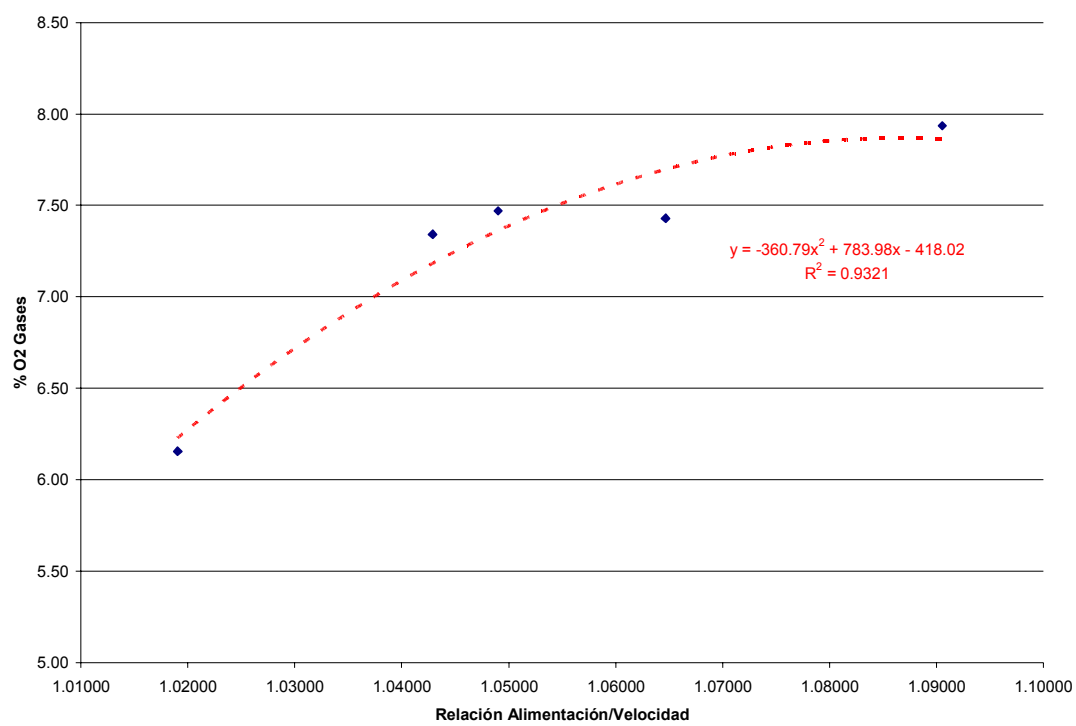


Gráfica 2: Correlación entre consumo calorífico y velocidad de rotación del horno¹



¹ Los datos de consumo calorífico se expresan en valores porcentuales obtenidos a partir de un valor promedio máximo en MJ/t.

Gráfica 3: Correlación entre contenido de SO₃ en harina caliente y relación alimentación/velocidadGráfica 4: Correlación entre contenido SO₃ en el clínker y relación alimentación/velocidad

Gráfica 5: Correlación entre contenido de O₂ en gases del horno y relación alimentación/velocidad

VIII. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos durante las pruebas se muestran satisfactorios. En las gráficas 1 y 2 los resultados se representan por medio de valores porcentuales ya que la empresa donde se llevaron las pruebas no permite que se publiquen valores reales. Los resultados son producto de un promedio calculado para los datos recopilados durante las pruebas realizadas. A partir de estos promedios se tomó el valor máximo como 100 % y con esto se calculó un valor porcentual para las demás promedios obtenidos.

En las gráficas 1 y 2 se observa buena correlación, con un índice de 0.9622 y 0.9621 respectivamente. A partir de estas correlaciones se deduce que el consumo energético dentro del horno va disminuyendo a medida que la velocidad de rotación del horno aumenta manteniendo la alimentación constante, es decir a medida que la relación alimentación/velocidad tiende a ser 1. Esto se puede explicar sabiendo que al aumentar la velocidad de rotación del horno, manteniendo la alimentación constante, se disminuye el grosor de la cama de material dentro de él, disminuyendo el consumo de energía requerido para calentar el material del centro de dicha cama. Por otro lado, en las condiciones antes indicadas, disminuye el tiempo de residencia del material dentro del horno. Debido a que la cama de material es más baja se necesita una carga térmica menor en el horno para quemar el material del centro de la cama, tal y como se explicó anteriormente; el hecho de tener una carga térmica más baja en la zona de clinkerización minimiza la evaporación del azufre con lo que este elemento se fija en mayor cantidad en el clinker y no forma parte de los gases de combustión.

En la gráfica 3 se observa que hay una disminución en el contenido de SO_3 en la harina caliente, a medida que la relación alimentación/velocidad del horno disminuye. Esto se debe a que la mayoría de SO_2 es captada por la harina cruda dentro del horno en forma de sulfato de calcio y sulfatos alcalinos los cuales salen con el clinker, esto ayuda a que menos SO_2 llegue al calcinador y a la torre precalentadora. Esto también es favorable ya que el SO_3 en altas concentraciones causa muchos problemas dentro del horno. La presencia elevada de azufre en los gases de combustión propicia la formación de anillos dentro del horno así como pegaduras en el precalentador, llegando al límite de tener que parar el horno durante varias horas e incluso días para limpiarlas. Uno de los propósitos principales al usar combustibles con alto contenido de azufre es capturar dicho azufre, existente en los gases de combustión, con la materia prima alimentada con el objeto de romper el ciclo de recirculación que tiene ese gas. En la medida que la concentración de SO_3 en la harina caliente entrando al horno se mantenga en niveles bajos se garantiza que el azufre está siendo absorbido por la materia prima y se fijará posteriormente en el clinker que sale del horno.

Luego en la gráfica 4 se observa que existe un aumento en el contenido de SO_3 en el clinker a medida que la relación alimentación/velocidad del horno disminuye, esta tendencia tiene una correlación baja pero, en la mayoría de los casos, se puede observar que el aumento se va dando a medida que la velocidad de rotación aumenta. El contenido alto de SO_3 en el clinker es un indicio que dicho elemento se está eliminando de la atmósfera del horno y absorbiendo en el clinker, lo cual es muy importante ya que como se mencionó anteriormente, el azufre es un gas que causa muchos problemas en la operación. Al comparar esta gráfica con la gráfica 3 se observa que hay una concordancia entre ellas ya que a medida que más SO_2 es fijado dentro del horno en el clinker menos SO_2 llega a fijarse en la harina cruda. Por otro lado para fabricar el cemento es necesario agregar yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) al clinker por lo que, mientras más SO_3 contenga el clinker disminuirá la cantidad de yeso que se le debe agregar, lo cual es ventajoso. Debido a que la mayor parte de SO_3 fijado en el clinker se encuentra en forma de sulfatos alcalinos (K_2SO_4 y Na_2SO_4) y una pequeña fracción es CaSO_4 no se puede dejar de agregar yeso, ya que el sulfato alcalino no actúa de la misma forma que el sulfato de calcio, los sulfatos alcalinos son bastante más solubles en agua que el sulfato de calcio.

La gráfica 5 presenta la relación entre la cantidad de O_2 en los gases de la recámara del horno con la relación alimentación/velocidad. Se obtuvo una buena correlación con un índice de 0.9321. Se observa que a medida que la relación disminuyó, la cantidad de O_2 también disminuyó. La disminución del oxígeno dentro del horno no se considera favorable debido a que puede promover una atmósfera reductora dentro del mismo, lo cual afecta la evaporación de azufre tal y como se menciona anteriormente; Sin embargo, al analizar esta gráfica en conjunto con las gráficas 3 y 4 se deduce que, a pesar de operar con menor cantidad de oxígeno la evaporación de azufre es menor lo cual es deseable. Las irregularidades en los niveles de oxígeno se pueden atribuir a operación inadecuada del horno o a alguna entrada de aire falso dentro del mismo; como se observa en la gráfica 5 los niveles de oxígeno van aumentando a medida que la altura de la cama dentro del horno aumenta, esto no tienen sentido ya que al aumentar la cama de material se reduce el área seccional dentro del horno y eso lleva a tener una menor cantidad de O_2 dentro del mismo.

De todas las gráficas anteriores se deduce que al incrementar la velocidad de rotación del horno manteniendo constante la alimentación se logra una ligera disminución en el consumo térmico y se logra, a mediano plazo, una operación más estable del mismo debido a que, al minimizar la evaporación de azufre se minimizará también la formación tanto de anillos dentro del horno como de pegaduras en la torre de precalentadores.

IX. CONCLUSIONES

- El consumo energético del horno disminuye ligeramente a medida que la relación alimentación/velocidad tiende a ser 1, la relación 1.019 es la que dio los mejores resultados.
- La cantidad de SO_3 en la harina caliente entrando al horno disminuye a medida que la relación alimentación/velocidad tiende a ser 1, lo cual es un indicativo de que la cantidad de SO_2 presente en los gases de combustión va disminuyendo a medida que se incrementa la velocidad.
- La cantidad de SO_3 en el clínker aumenta a medida que la relación alimentación/velocidad tiende a ser 1, lo cual es deseable pues es un indicativo directo de que el SO_2 presente en los gases de combustión del horno está siendo fijado en el clínker y en consecuencia eliminado de la atmósfera del horno.
- A pesar que el contenido de O_2 en los gases de combustión va disminuyendo a medida que la relación alimentación/velocidad tiende a 1, es en esta relación en la cual se lograron mejores resultados en cuanto a fijación del SO_2 en el clínker, como se mencionó anteriormente esto se puede deber a operación inadecuada o a entradas de aire falso no deseadas.

X. RECOMENDACIONES

- Debido a que cuando la relación alimentación/velocidad tiende a ser 1 se obtienen los mejores resultados es recomendable realizar pruebas en donde la relación alimentación/velocidad sea incluso menor a 1 para poder investigar si la tendencia a disminuir del consumo energético y del contenido de SO₂ en los gases de combustión persiste. Desafortunadamente debido a limitaciones del proceso no se pudo incrementar la velocidad de rotación por lo que considero conveniente hacer pruebas disminuyendo la alimentación al horno para lograr relaciones de hasta 0.95. Esto se podrá realizar en épocas de baja demanda y durante un período corto de tiempo, por ejemplo 2 ó 3 días.
- Será conveniente realizar análisis microscópicos de la cristalografía del clínker para determinar si existe algún beneficio adicional al ir disminuyendo la relación alimentación/velocidad ya que durante este experimento no se tuvo la oportunidad de realizarlos a pesar que en la empresa sí se realizan.

XI. BIBLIOGRAFÍA

- ASTM International, 2003. *Annual Book of ASTM Standards 2003*. Volume 04.01 Cement; Lime; Gypsum. Baltimore USA. Págs. 151
- Calleja, José. 2005. *Esparcimientos en torno al Clínter, al Cemento Pórtland y al Hormigón*. Holcim Cement No. 875. España. Págs. 4-13.
- Ghosh, S.N. 1991. *Cement and Concrete Science & Technology, Vol 1 Part I*. 1ª Edición. ABI Books Private Limited, New Delhi, India. 418 Págs.
- Glasser, F.P. 2004. *Innovations in Portland Cement Manufacturing*. Portland Cement Association, PCA. Estados Unidos. Págs. 331-368.
- Hankes, Bill. 2006. *Upgrading Kiln Production*. World Cement. Estados Unidos. Págs. 9-12.
- Labahn, Otto. Kohlhaas B. 1983. *Cement Engineers' Handbook*. 4ª Edición. Wiesbadener Graphische Betriebe GmbH, Wiesbaden, Alemania. 779 Págs.
- Liu, Xiaoyan. Specht, Eckehard. Meelmann, Jochen. 2005. *Influencia del movimiento rotativo y del tiempo de permanencia transversal de las partículas en hornos rotativos*. ZKG International No. 2-2005. Alemania. Págs. 62-73.
- Locher, G. 2005. *Modelos Matemáticos del Proceso de Cocción del Clínter del Cemento Parte 3: Horno Rotatorio*. Holcim Cement No. 873. Düsseldorf, Alemania. Págs. 10-21.
- Locher, G. 2005. *Modelos Matemáticos del Proceso de Cocción del Clínter del Cemento Parte 5: Instalación Completa*. Holcim Cement No. 875. Düsseldorf, Alemania. Págs. 16-23.
- Peray, Kurt E. 1979. *Cement Manufacturer's Handbook*. 1ª Edición. Chemical Publishing Co., Inc. Estados Unidos. 403 Págs.
- Peray, Kurt E. 1986. *The Rotary Cement Kiln*. 2ª Edición. Chemical Publishing Co., Inc. Estados Unidos. 389 Págs.
- Singer, Joseph G. 1991. *Combustion Fossil Power*. 4ª Edición. Combustion Engineering, Inc. Windsor, Connecticut. Estados Unidos. 917 Págs

XII. Apéndice

A. Glosario

- **Alita o C₃S**: Nombre común para el silicato tricálcico, $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ formado por la fusión de óxido de calcio CaO y silicato dicálcico ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$).
- **Productos alcalinos de azufre**: Producto de la reacción entre óxido de potasio K_2O ó sodio Na_2O y trióxido de azufre SO_3 dando como resultado K_2SO_4 ó Na_2SO_4 .
- **Belita o C₂S**: Nombre común para el silicato dicálcico, $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ formado por la fusión de óxido de calcio y dióxido de sílice SiO_2 .
- **C₃A**: Aluminato tricálcico, $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ formado por la fusión de óxido de calcio y trióxido de aluminio Al_2O_3 .
- **Caliza**: Materia prima para la producción de cemento compuesta principalmente por CaCO_3 , MgCO_3 y Al_2O_3 .
- **Celita o C₄AF**: Nombre común para el compuesto $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ formado por la fusión del óxido de calcio con el trióxido de aluminio y el óxido férrico.
- **Cemento Pórtland**: Material proveniente de la molturación de clínker y yeso, puede tener otros componentes tales como la caliza y la puzolana.
- **Clínker**: Mineral proveniente de la fusión de materiales calcáreos, silíceos y ferrosos, en el que están presentes los cristales de Alita, Belita, Celita principalmente y que posee características hidráulicas.
- **Clinkerización**: Proceso de cocción de los materiales calcáreos, silíceos y ferrosos provenientes de las materias primas a altas temperaturas ($1,500\text{ }^\circ\text{C}$). En la actualidad dicho proceso se lleva a cabo dentro de hornos rotativos.
- **Coque de petróleo**: Residuo de la destilación del petróleo utilizado como combustible.
- **Esquisto**: Materia prima para la producción de cemento compuesta principalmente por SiO_2 , Al_2O_3 y mineral de hierro por Fe_2O_3 .
- **Harina cruda**: Materia prima para la fabricación de clínker conformada por caliza, esquisto y hierro finamente molidos.
- **Puzolana**: Material silíceo encontrado en la naturaleza que puede contener también aluminio y hierro con la particularidad que presenta propiedades hidráulicas debido a que tiene alto contenido de sílice amorfa. También tiene la particularidad de que reacciona con CaOH_2 para formar compuestos aglomerantes.
- **Tiempo de residencia**: Tiempo durante el cual las materias primas permanecen dentro de cualquier proceso en el cual esté involucrado un reactor.
- **Vía húmeda**: Proceso de producción de cemento en el cual la harina cruda se mezcla con agua para lograr homogeneidad.

- **Vía seca:** Proceso de producción de cemento en el que no se agrega agua a la harina cruda.
- **Yeso:** Sulfato de calcio cuya composición es CaSO_4 y que puede ser de origen natural (en canteras) o subproducto industrial (plantas de generación eléctrica).

B. Cuadro 2: Datos obtenidos

Día	Hora	Alimentación (%)	Velocidad (%)	Realción	Consumo (%)	%O2	Harina caliente	Clínker
							SO3	SO3
29/05/2006	16:00	100.00%	93.43%	1.091	94.91%	8.8		
29/05/2006	17:00	100.00%	93.43%	1.091	99.42%	8.0	2.44	1.67
29/05/2006	18:00	100.00%	93.43%	1.091	100.68%	8.0		
29/05/2006	19:00	93.93%	88.57%	1.081	103.13%	10.0		
29/05/2006	20:00	100.00%	93.43%	1.091	97.92%	6.6		
29/05/2006	21:00	100.00%	93.43%	1.091	95.59%	7.8		
29/05/2006	22:00	100.00%	93.43%	1.091	97.46%	8.1		
29/05/2006	23:00	100.00%	93.43%	1.091	97.79%	6.8		
29/05/2006	0:00	100.00%	93.43%	1.091	98.04%	7.2		
30/05/2006	1:00	100.00%	93.43%	1.091	98.59%	9.2	2.33	1.1
30/05/2006	2:00	100.00%	93.43%	1.091	100.71%	7.5		
30/05/2006	3:00	100.00%	93.43%	1.091	100.83%	9.0		
30/05/2006	4:00	100.00%	93.43%	1.091	99.73%	10.0		
30/05/2006	5:00	100.00%	93.43%	1.091	99.67%	8.0		
30/05/2006	6:00	100.00%	93.43%	1.091	99.11%	9.6		
30/05/2006	7:00	100.00%	93.43%	1.091	98.53%	9.1		
30/05/2006	8:00	100.00%	93.43%	1.091	98.93%	8.0		
30/05/2006	9:00	100.00%	93.43%	1.091	103.04%	10.1	2.48	1.65
30/05/2006	10:00	100.00%	93.43%	1.091	102.39%	10.1		
30/05/2006	11:00	100.00%	93.43%	1.091	101.84%	9.1		
30/05/2006	12:00	100.00%	93.43%	1.091	97.86%	10.1		
30/05/2006	17:00	100.00%	93.43%	1.091	100.95%	5.1	2.39	1.73
30/05/2006	18:00	100.00%	93.43%	1.091	101.26%	6.0		
30/05/2006	19:00	100.00%	93.43%	1.091	103.99%	7.1		
30/05/2006	20:00	100.00%	93.43%	1.091	100.43%	10.0		
30/05/2006	21:00	100.00%	93.43%	1.091	102.06%	10.0		
30/05/2006	22:00	100.00%	93.43%	1.091	101.87%	10.0		
30/05/2006	23:00	100.00%	93.43%	1.091	100.43%	6.5		
30/05/2006	0:00	100.00%	93.43%	1.091	99.85%	5.4		
31/05/2006	1:00	100.00%	93.43%	1.091	101.29%	6.0	2.71	1.63
31/05/2006	2:00	100.00%	93.43%	1.091	99.70%	7.6		
31/05/2006	3:00	100.00%	93.43%	1.091	99.60%	6.8		
31/05/2006	4:00	100.00%	93.43%	1.091	99.54%	7.0		
31/05/2006	5:00	100.00%	93.43%	1.091	99.36%	7.2		
31/05/2006	6:00	100.00%	93.43%	1.091	98.99%	8.8		
31/05/2006	7:00	100.00%	93.43%	1.091	98.65%	6.7		
31/05/2006	8:00	100.00%	93.43%	1.091	99.05%	6.1		
31/05/2006	9:00	100.00%	93.43%	1.091	95.99%	7.7	2.49	1.38
31/05/2006	10:00	100.00%	93.43%	1.091	100.25%	9.8		
31/05/2006	14:00	100.00%	93.43%	1.091	96.94%	5.7		
31/05/2006	15:00	100.00%	93.43%	1.091	99.70%	5.5		
01/06/2006	8:00	100.00%	93.43%	1.091	99.24%	3.0		
01/06/2006	9:00	100.00%	93.43%	1.091	103.19%	9.2	2.88	1.7

01/06/2006	10:00	100.00%	93.43%	1.091	100.46%	5.5		
01/06/2006	11:00	100.00%	93.43%	1.091	99.02%	5.7		
01/06/2006	12:00	100.00%	93.43%	1.091	98.56%	10.0		
01/06/2006	13:00	100.00%	93.43%	1.091	98.10%	10.0		
01/06/2006	14:00	100.00%	93.43%	1.091	95.74%	10.0		
01/06/2006	15:00	100.00%	93.43%	1.091	105.86%	5.2		
01/06/2006	16:00	100.00%	93.43%	1.091	99.08%	10.0		
01/06/2006	17:00	100.00%	93.43%	1.091	96.94%	10.0	2.41	1.73
		99.88%	93.33%	1.091	99.65%	7.9	2.52	1.57
01/06/2006	18:00	100.00%	100.00%	1.019	96.66%	7.9		
01/06/2006	19:00	100.00%	100.00%	1.019	97.40%	5.9		
01/06/2006	20:00	100.00%	100.00%	1.019	97.21%	6.5		
01/06/2006	21:00	100.00%	100.00%	1.019	99.39%	5.3		
01/06/2006	22:00	100.00%	100.00%	1.019	99.33%	6.6		
01/06/2006	23:00	100.00%	100.00%	1.019	99.17%	6.1		
02/06/2006	0:00	100.00%	100.00%	1.019	100.52%	5.5		
02/06/2006	1:00	100.00%	100.00%	1.019	100.59%	5.5	2.17	1.68
		100.00%	100.00%	1.019	98.78%	6.2	2.17	1.68
02/06/2006	4:00	100.00%	97.14%	1.049	99.51%	6.5		
02/06/2006	5:00	100.00%	97.14%	1.049	95.37%	6.6		
02/06/2006	6:00	100.00%	97.14%	1.049	100.09%	3.0		
02/06/2006	7:00	100.00%	97.14%	1.049	101.23%	7.1		
		100.00%	97.14%	1.049	99.05%	5.8		
02/06/2006	8:00	100.00%	97.71%	1.043	100.59%	6.5		
02/06/2006	9:00	100.00%	97.71%	1.043	100.55%	8.5	2.18	1.56
02/06/2006	10:00	100.00%	97.71%	1.043	100.68%	7.9		
02/06/2006	11:00	100.00%	97.71%	1.043	99.36%	7.3		
02/06/2006	12:00	100.00%	97.71%	1.043	98.13%	7.8		
02/06/2006	13:00	100.00%	97.71%	1.043	99.73%	7.7		
02/06/2006	14:00	100.00%	97.71%	1.043	98.25%	5.7		
		100.00%	97.71%	1.043	99.61%	7.3	2.18	1.56
02/06/2006	15:00	100.00%	95.71%	1.065	95.40%	7.0		
02/06/2006	16:00	100.00%	95.71%	1.065	97.86%	8.0		
02/06/2006	17:00	100.00%	95.71%	1.065	98.04%	9.3		
02/06/2006	18:00	100.00%	95.71%	1.065	98.78%	8.9	2.25	1.80
02/06/2006	19:00	100.00%	95.71%	1.065	99.73%	7.7		
02/06/2006	20:00	100.00%	95.71%	1.065	99.97%	9.4		
02/06/2006	21:00	100.00%	95.71%	1.065	99.97%	6.2		
02/06/2006	22:00	100.00%	95.71%	1.065	99.24%	7.4		
02/06/2006	23:00	100.00%	95.71%	1.065	100.98%	7.3		
03/06/2006	0:00	100.00%	95.71%	1.065	100.92%	7.8		
03/06/2006	1:00	100.00%	95.71%	1.065	97.83%	7.2	2.26	1.69
03/06/2006	2:00	100.00%	95.71%	1.065	100.28%	9.3		
03/06/2006	3:00	100.00%	95.71%	1.065	98.29%	9.4		
03/06/2006	4:00	100.00%	95.71%	1.065	101.93%	7.4		
03/06/2006	5:00	100.00%	95.71%	1.065	99.48%	7.5		
03/06/2006	6:00	100.00%	95.71%	1.065	101.60%	7.2		
03/06/2006	7:00	100.00%	95.71%	1.065	101.29%	6.9		

03/06/2006	8:00	100.00%	95.71%	1.065	101.32%	5.7		
03/06/2006	9:00	100.00%	95.71%	1.065	102.61%	4.9	2.88	1.54
03/06/2006	10:00	100.00%	95.71%	1.065	103.44%	4.1		
		100.00%	95.71%	1.065	99.95%	7.4	2.46	1.68
03/06/2006	11:00	100.00%	97.14%	1.049	101.23%	5.2		
03/06/2006	12:00	100.00%	97.14%	1.049	99.27%	7.4		
03/06/2006	13:00	100.00%	97.14%	1.049	97.43%	9.7		
03/06/2006	14:00	100.00%	97.14%	1.049	99.21%	9.7		
03/06/2006	15:00	100.00%	97.14%	1.049	99.76%	7.4		
03/06/2006	16:00	100.00%	97.14%	1.049	97.46%	7.9		
03/06/2006	17:00	100.00%	97.14%	1.049	100.31%	7.9	1.96	1.62
03/06/2006	18:00	100.00%	97.14%	1.049	100.49%	7.9		
03/06/2006	19:00	100.00%	97.14%	1.049	101.32%	6.8		
03/06/2006	20:00	100.00%	97.14%	1.049	101.35%	7.1		
03/06/2006	21:00	100.00%	97.14%	1.049	101.87%	7.2		
03/06/2006	22:00	100.00%	97.14%	1.049	101.51%	7.6		
03/06/2006	23:00	100.00%	97.14%	1.049	101.72%	8.1		
03/06/2006	0:00	100.00%	97.14%	1.049	97.49%	8.2		
04/06/2006	1:00	100.00%	97.14%	1.049	99.48%	7.4	2.21	1.68
04/06/2006	2:00	100.00%	97.14%	1.049	100.71%	8.5		
04/06/2006	3:00	100.00%	97.14%	1.049	100.55%	8.2		
04/06/2006	4:00	100.00%	97.14%	1.049	100.92%	8.8		
04/06/2006	5:00	100.00%	97.14%	1.049	100.19%	8.1		
04/06/2006	6:00	100.00%	97.14%	1.049	101.81%	8.0		
04/06/2006	7:00	100.00%	97.14%	1.049	100.80%	8.4		
04/06/2006	8:00	100.00%	97.14%	1.049	102.79%	7.7		
04/06/2006	9:00	100.00%	97.14%	1.049	105.00%	8.2	2.04	1.66
04/06/2006	10:00	100.00%	97.14%	1.049	101.54%	7.0		
04/06/2006	11:00	100.00%	97.14%	1.049	101.20%	7.2		
04/06/2006	12:00	100.00%	97.14%	1.049	97.98%	8.0		
04/06/2006	13:00	100.00%	97.14%	1.049	98.50%	7.1		
04/06/2006	14:00	100.00%	97.14%	1.049	99.24%	5.9		
04/06/2006	15:00	100.00%	97.14%	1.049	98.75%	6.1		
04/06/2006	16:00	100.00%	97.14%	1.049	95.07%	7.9		
04/06/2006	17:00	100.00%	97.14%	1.049	99.67%	6.9	2.47	1.61
04/06/2006	18:00	100.00%	97.14%	1.049	99.73%	7.8		
04/06/2006	19:00	100.00%	97.14%	1.049	100.28%	9.4		
04/06/2006	20:00	100.00%	97.14%	1.049	99.97%	6.2		
04/06/2006	21:00	100.00%	97.14%	1.049	100.28%	7.2		
04/06/2006	22:00	100.00%	97.14%	1.049	102.39%	9.1		
04/06/2006	23:00	100.00%	97.14%	1.049	101.78%	5.9		
04/06/2006	0:00	100.00%	97.14%	1.049	99.39%			
05/06/2006	1:00	100.00%	97.14%	1.049	99.97%		2.62	1.63
05/06/2006	2:00	100.00%	97.14%	1.049	99.82%			
05/06/2006	3:00	100.00%	97.14%	1.049	96.54%			
05/06/2006	4:00	100.00%	97.14%	1.049	96.35%			
05/06/2006	5:00	100.00%	97.14%	1.049	101.11%			
05/06/2006	6:00	100.00%	97.14%	1.049	100.71%			

05/06/2006	7:00	100.00%	97.14%	1.049	101.84%			
05/06/2006	8:00	100.00%	97.14%	1.049	99.05%			
05/06/2006	9:00	100.00%	97.14%	1.049	100.00%	7.5	2.26	1.64