



**Balance energetico de cuatro
alternativas de operación de
hornos de Cuba vertical para la
producción de cal hidratada**

Autor: Alberto Ochoa Monteagudo

Tutores: Dr. Pedro A Ochoa George

Curso 2006 - 2007

“Año 49 de la Revolución”

INTRODUCCION

Una tarea de vital importancia para la industria azucarera cubana es la reducción del costo de la tonelada de azúcar, tal como se indica en el Informe Central al V Congreso del Partido Comunista de Cuba^[2] "*...Hay que reducir los costos de producción de la tonelada de azúcar pues es una industria de la que no podemos prescindir...*".

En relación con una estrategia económica a mediano plazo, en la Resolución Económica del V Congreso del Partido Comunista de Cuba^[3] se plantea "*...Esta estrategia debe comprender la producción de azúcar y sus derivados, la modernización de la tecnología básica y la infraestructura, con el fin de reducir los costos en la industria...*".

Por otra parte, resulta conocido el hecho de que en la medida en que sea más costosa e ineficiente la elaboración de un producto intermedio requerido para la fabricación de un producto final, así habrá que aumentar el precio de venta de este para lograr producir sin pérdidas, pero esta elevación del precio de venta hace que se reduzca la competitividad del producto dificultando su inserción en el mercado, lo que afecta la economía del país.

El aseguramiento para cubrir las necesidades de nuestra economía exige tanto el desarrollo continuado de la industria azucarera como el perfeccionamiento significativo de su eficiencia general, por ser esta industria una de las principales bases sustentadoras de la economía del país.

El agente químico más ampliamente utilizado en la industria azucarera es la cal en forma de hidrato. En Cuba la producción de hidrato de cal destinado como agente químico a los centrales azucareros está, en lo fundamental, en manos del MINAZ, por lo que el grado de eficiencia y economía de esta producción afecta marcadamente a la producción de azúcar y la economía del propio organismo productor.

El acelerado desarrollo de las ciencias en la actualidad, en conjunción con las exigencias de un mercado altamente competitivo, ha condicionado el surgimiento y consolidación de una tendencia racionalizadora en lo que a producción se refiere, es decir, el diseño y explotación de nuevos equipos y tecnologías así como la sustitución, remodelación o adecuación de los ya existentes y por encima de todo lo anterior, el establecimiento y funcionamiento sistemático de un riguroso control técnico desarrollado sobre bases científicamente fundamentadas, que permita tomar decisiones con conocimiento de causas y efectos teniendo siempre como línea principal el logro de una elevada eficiencia que se traduzca en una mayor economía en los procesos y una mayor calidad en los productos. Dentro de esta línea, la intención de este trabajo es contribuir al aumento de la eficiencia y economía de la producción de cal destinada a la industria azucarera como agente químico.

En el mundo la producción de cal se ejecuta también con mucho empirismo y sobre bases no totalmente científicas. A pesar del

elevado costo que para esta producción representa el consumo de combustible en los hornos, no se encuentran referencias en la literatura sobre balances energéticos, basados en la Primera Ley del Termodinámica, para, por una parte, analizar diversas posibles alternativas de explotación industrial de los hornos buscando la más económicamente viable y, por otra parte, la realización de balances energéticos de los hornos serían la referencia para contrastar los resultados de la realización de balances exergéticos, basados en la Primera y la Segunda Leyes de la Termodinámica, lo que permitiría conocer los límites reales del aprovechamiento del calor en tales hornos, lo cual actualmente es totalmente desconocido.

En Cuba ésta se produce prácticamente sin controles técnicos, sin instrumentación y sin la preparación mínima requerida del personal de las caleras, lo que pone de manifiesto el desconocimiento y el descontrol técnico existentes en el país alrededor de esta producción, a partir de un problema de transferencia de tecnología mal absorbida.

A mediados de la década del 70 comenzó en Cuba un proceso de reconversión industrial de la producción de cal a partir de la concentración en medianas instalaciones industriales de la antiguamente dispersa, ineficiente y artesanal producción de cal hecha en hornos rústicos y destinada como agente químico a los centrales azucareros. Aquí apareció, y aún permanece, un problema de transferencia de tecnología mal absorbida^[40], ya que se compró a

México tanto el equipamiento de producción como el diseño de los hornos, pero ni el personal para operar estas plantas, ni el personal técnico de cualquier nivel involucrado en esta producción fue jamás entrenado en esta nueva tecnología en ningún centro especializado, ni tampoco se entrenan en la actualidad a pesar del profundo cambio tecnológico efectuado, lo que refleja el bajo grado de prioridad de esta industria.

Todas las operaciones que se realizan en un horno de cal están encaminadas a la obtención económica de cal viva con la calidad requerida, es decir, están enfocadas a la ejecución de los tres procesos principales, el precalentamiento de las rocas hasta la temperatura de disociación, la disociación de los carbonatos contenidos en la caliza y el requerido sobrecalentamiento de la capa de cal formada para lograr un ritmo de producción económico. Estos procesos, en particular la disociación, sólo tienen lugar a partir de elevados consumos energéticos^[13], por lo que la cantidad de calor consumido a partir de la energía liberada por el combustible quemado y transferida a la carga del horno, es un factor fundamental para lograr una producción económica y, a la vez, tiene una gran influencia sobre la calidad de la cal^[24,44].

Asociadas a esto, las pérdidas de calor de todo tipo tienen una gran influencia sobre la disponibilidad de éste para llevar a cabo los procesos principales, o en otras palabras, sobre los costos de producción, pues según se conoce, el costo del combustible

utilizado en los hornos representa el 50 % de los costos de producción de cal hidratada^[13,17,60], razón por la que trabajar a temperaturas excesivas en el horno implica un aumento de dichos costos; por otra parte, a pesar que desde el punto de vista de la velocidad de la reacción de disociación, lo más adecuado sería tener en el horno la máxima temperatura, en realidad esto no es posible porque existen límites para ésta impuestos por los daños que ocasiona a la calidad de la cal.

Además del problema señalado anteriormente, desde el punto de vista de las operaciones, tampoco es conveniente trabajar a excesivas temperaturas por cuanto debido a la presencia de impurezas en la caliza, el punto de fusión de ésta resulta apreciablemente más bajo que el del carbonato de calcio puro^[13,43,77], lo que hace que después de las extracciones al horno, las rocas que continúan dentro, en incipiente estado de fusión por excesiva temperatura, se enfríen por la inevitable entrada de aire a temperatura ambiente y se unan en una masa única, lo que se conoce en las caleras como “horno colgado”^[13], provocando paradas en el horno que pueden durar muchas horas.

Como sustento general de la realidad que enfrenta actualmente la producción de hidrato de cal destinado como agente químico a los centrales azucareros, en todas las caleras del MINAZ solo existe una sola variante de explotación de los hornos, la cual es, increíblemente, la explotación de estos sin ningún tipo de recuperación de calor. No se necesita ningún tipo de demostración

para saber que esta es la alternativa de explotación de hornos más antieconómica posible y, sin embargo, no se conoce de ningún esfuerzo por analizar otras variantes más económicas y sustentables. Todo esto muestra la necesidad del más estricto control tanto sobre el consumo de combustible, como sobre las alternativas de operación de los hornos^[48].

Como quiera que la realidad cubana actual de la producción de cal se desenvuelve bajo las condiciones descritas, surgen las siguientes interrogantes:

? Será posible que la producción de cal en Cuba se pueda realizar sobre bases menos empíricas, dado los altos costos de esta producción?.

?Será posible desarrollar balances energéticos de hornos de cuba vertical para analizar diferentes alternativas de explotación?.

A partir de estas interrogantes se planteó la siguiente hipótesis:

Hipótesis

Un enfoque determinista, fundamentado en el Primer Principio de la Termodinámica, para desarrollar los balances energéticos de diversas alternativas de operación de hornos de cuba vertical utilizados en la calcinación de calizas para la producción de cal, permite conocer la cantidad de calor consumido en el proceso, lo cual constituye una herramienta útil para la toma de decisiones más acertadas sobre la utilización de las diversas variantes de explotación de los hornos, con conocimiento de las causas que originan las desviaciones de los

parámetros con influencia sobre la rentabilidad de esta producción, y la cuantificación de estas desviaciones.

Problema científico

Realización de balances energéticos de hornos de cuba vertical para la producción de cal.

Objetivo general

Realizar el balance energético de cuatro esquemas de operación de los hornos de cuba vertical utilizados en Cuba, para la producción de la cal, y determinar la mejor variante de explotación.

Objetivos específicos del trabajo

1. Caracterizar la problemática actual de la producción de cal.
2. Realizar un análisis crítico del trabajo de los hornos de cal y de la eficiencia térmica de estos equipos.
3. Investigar la relación existente entre el aspecto energético y los resultados del proceso en la producción de cal.
4. Realizar balances energéticos, basados en la Primera Ley de la Termodinámica, de cuatro alternativas de explotación de los hornos.

De acuerdo con estos objetivos el trabajo se inició con la búsqueda bibliográfica para conocer del estado actual de desarrollo de la industria de la cal en el mundo y, sorprendentemente, apenas se encuentra literatura sobre el tema, aún cuando se sabe del conocimiento milenario de la humanidad alrededor de esta

producción. Este hecho puede ser debido a dos factores principales, a saber:

Las investigaciones realizadas en este campo por compañías privadas no son publicadas por cuanto de hacerlo atentarían contra la competitividad de la compañía.

Aún cuando en la calcinación de la roca caliza concurren grandes complejidades, tanto teóricas como prácticas, se conoce de la existencia de un generalizado concepto erróneo sobre la aparente sencillez del proceso, lo que reduce esta producción a un nivel tal de simplicidad que también limita el desarrollo en este campo [17].

Los efectos resultantes de la conjunción de los dos factores anteriores condicionan la existencia del desconocimiento y descontrol técnico, señalados anteriormente, en la producción de cal, particularmente en Cuba, siendo este el reto a que enfrenta este trabajo desarrollado a partir de datos tomados en la calera del antiguo CAI “Pepito Tey” de la provincia de Cienfuegos, lo cual permite tener una visión científicamente fundamentada que permite brindar recomendaciones para elevar la eficiencia de la industria de la cal en el país.

Para su mejor comprensión este trabajo ha sido estructurado en tres capítulos, en los que se explican los objetivos, metodología de trabajo y los resultados alcanzados.

En el primer capítulo se realiza el estudio crítico de la bibliografía, que implica la valoración de los antecedentes del trabajo y el estado

actual del enfoque bibliográfico para lograr la solución de los problemas planteados.

En el segundo capítulo se desarrollan los fundamentos del modelo físico para el balance energético de cuatro alternativas de explotación de hornos de cuba vertical para la producción de cal.

En el tercer capítulo se desarrolla el balance energético para cuatro alternativas de explotación de los hornos de cuba vertical utilizados en la producción de cal.

En cada uno de los capítulos que conforman el cuerpo de esta tesis se da respuesta a los problemas científicos que se abordan en ellos, de modo que se llega a conclusiones que aumentan el caudal de conocimientos en este campo y que, por una parte, permiten brindar recomendaciones prácticas a la industria y, por otra, sirven como base para el desarrollo de estudios posteriores más avanzados.

CAPITULO 1. ESTADO ACTUAL DEL PROBLEMA

1.1. Análisis del estado del conocimiento sobre la producción de cal en Cuba y en el mundo

La bibliografía sobre la producción de cal resulta pobre en comparación con la existente sobre otras industrias^[13,29,53]. Esto resulta sorprendente si se tiene en cuenta lo antiguo del conocimiento sobre esta producción y lo ampliamente distribuida que está en el mundo^[12,17], y a que desde tiempos remotos se conocen las cuatro operaciones básicas que conforman el proceso^[13,17,25].

- Reducción y calibración del tamaño de roca a calcinar
- Calcinación de la roca caliza para obtener cal viva
- Hidratación de la cal viva
- Separación de los núcleos sin calcinar

Entre los factores que provocan esta situación está el hecho de la engañosa simplicidad aparente de esta producción, según muestran las palabras de Boynton^[13] en relación con la calcinación de calizas ”... *Esta es probablemente la más elemental y aparentemente más simple de todas las reacciones químicas. Pero mientras es teóricamente muy trivial (muchos químicos eruditos la desdeñan por su elementalidad), muchas complejidades concurren en esta reacción. Como evidencia de esto, han sido muchos los ingenieros de alto calibre, con imponentes grados científicos y reforzados por una amplia experiencia en otros procesos piroquímicos quienes han encontrado complejas dificultades*

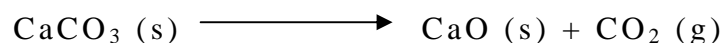
operacionales en la producción de cal. El autor es conocedor de varios ejemplos de grandes compañías, estimadas por su intuición en investigaciones e ingeniería, quienes, en plantas cautivas, sorpresivamente producen cal de pobre calidad con mediocre eficiencia, y lo más patético de todo es que no parecen darse cuenta de la diferencia. Ellos han considerado simplemente al producto y al proceso como primarios y han limitado el estudio de éstos. Tal simplificación es costosa...”. En el mismo sentido y de forma más categórica se expresa Gibbs^[26], quien escribe “... El desconocimiento, los conceptos erróneos y la ignorancia total han dado como resultado pobres disposiciones para la producción de la cal...”.

1.2.- Generalidades

En la figura 1.1 se muestra el esquema básico del flujo de producción de cal hidratada, el que puede ser más complicado en función de las fuentes de financiamiento y la demanda del mercado^[20,32,75], pero siempre serán variaciones a partir del esquema mostrado.

Las particularidades del proceso de producción han sido descritas en muchos trabajos^[9,12,13].

Las rocas calizas extraídas de la cantera pasan a la unidad de molienda y tamizado, donde se reducen y calibran a las dimensiones requeridas por los hornos para ser calcinadas, proceso donde se produce la conversión en óxido de calcio (CaO) del carbonato de calcio (CaCO₃) contenido en las rocas calizas, representado mediante la ecuación:



La reacción de disociación del carbonato de calcio es provocada exclusivamente por el calor absorbido por las rocas cargadas en el horno^[11,13,30,43,72], a partir del suministro de calor a éste, utilizándose diversos tipos de combustibles para este fin^[23,42].

Como las rocas calizas no son un material químicamente puro, el material obtenido durante la calcinación de estas rocas no es óxido de calcio puro, sino una mezcla de éste con sustancias consideradas como impurezas y con núcleos de caliza sin calcinar, estos últimos debido a que industrialmente nunca se logra la disociación total de los carbonatos, tanto porque el tiempo requerido para tal propósito conspira contra la economía de la fábrica^[13,44,45], como por malas operaciones durante la explotación de los hornos. La mezcla de todas estas sustancias es lo que se conoce como cal viva, que es el producto realmente descargado de los hornos de cal.

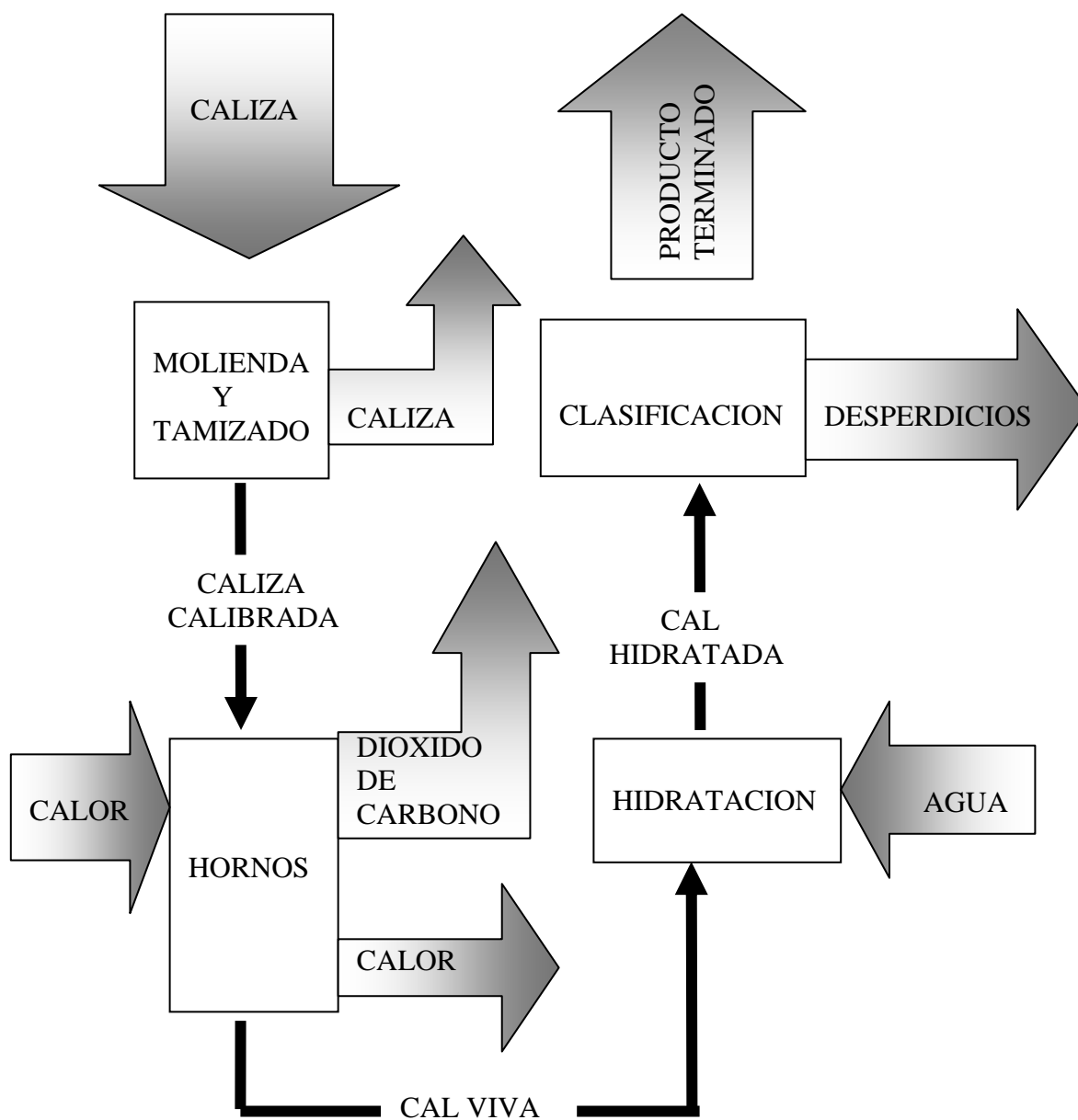
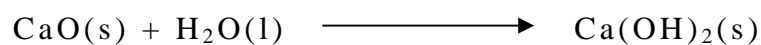


Figura 1.1: Esquema básico del flujo de producción de cal hidratada

Para la mayoría de los usos se prefiere la cal hidratada, resultante del “apagado” de la cal viva, significando con esta expresión la hidratación del óxido de calcio contenido en la cal viva, lo que se representa mediante la siguiente ecuación:



Después de la hidratación y con el objetivo de elevar la calidad del producto terminado, se hace pasar la cal hidratada por una etapa de clasificación para reducir la cantidad de caliza subcalcinada que la acompaña, aunque hay que destacar que en la corriente de los desperdicios siempre va una cantidad de cal, así como con el producto terminado va una cantidad de caliza subcalcinada, dependiendo estas cantidades de la eficiencia de la etapa.

Al observar la figura 1.1, en la unidad de molienda y tamizado de la caliza proveniente de la cantera, se aprecia que en esta operación se pierde parte de la materia prima debido a que las rocas que no cumplen con las especificaciones de tamaño, salen del proceso como desperdicios.

En la unidad de clasificación se pierde con los desperdicios parte de la cal producida, lo que implica la correspondiente pérdida de la materia prima y el combustible empleados en producirla.

En los hornos se obtiene el óxido de calcio, que es quién le da valor a la cal producida, a partir de la disociación de los carbonatos, provocada por el calor absorbido por las rocas, lo que implica que en esta etapa hay involucrados dos aspectos: el energético y el químico, influenciando el primero sobre los resultados alcanzados en el segundo, a partir del grado en que las rocas aprovechen el calor que absorben, lo que se ha definido^[48] como efectividad térmica del proceso, la cual tiene, entonces, una determinada influencia sobre el aprovechamiento del combustible y de la materia prima. No todo el calor entrado a los

hornos se transfiere a las rocas, pues parte de ese calor se pierde a través de las paredes, con los gases de salida y por incombustión química y mecánica. La eficiencia térmica del horno es el indicador que muestra la parte del calor suministrado al horno consumida por el proceso y, por tanto, cual parte corresponde a las pérdidas.

Todas estas etapas están vinculadas estrechamente debido al encadenamiento requerido por el proceso^[6,7].

La producción de cal en el mundo continúa basada sobre las cuatro operaciones referidas anteriormente y su desarrollo ha estado dado por la introducción de equipos más modernos, con mucha frecuencia a partir de la adaptación de equipos desarrollados en la industria del cemento por su similitud con la de la cal^[52,62,65], como los hornos rotatorios, los de lecho fluidizado y los hornos ciclónicos^[23,73], los que requieren de la utilización de sofisticados medios de control automático^[64,73], aunque sobre los más generalizados hornos de cuba vertical, se han realizado múltiples modificaciones^[22,23,28,49,51,59] conducentes a diseños más eficientes^[51,68,69,71,79] de este tipo de horno. Es preciso señalar que aún en la actualidad se siguen utilizando los antiguos e ineficientes hornos rústicos, anteriormente utilizados en Cuba, de los que, por ejemplo, en Centroamérica hay más de 500 de este tipo en explotación actualmente^[31].

Estos hechos han tenido serias consecuencias tanto para las caleras como para los propios centrales^[1], puesto que, bajo estas condiciones no existe el concepto sobre el control operacional que debe haber sobre

cualquier proceso industrial, lo que ha conducido a una baja eficiencia en la producción de cal debido al derroche de combustible y materia prima con que se realiza actualmente.

En la tabla 1.3 se comparan el consumo específico de calor de los hornos de la calera del CAI “Pepito Tey”, considerada la más eficiente del MINAZ, y los consumos de varios hornos reportados en la literatura^[28,63]. El resultado de tal comparación pone de manifiesto el derroche de combustible a que se hace referencia, puesto que los hornos de la calera cubana solamente son menos consumidores de combustible que los hornos rústicos reportados por la entidad inglesa Intermediate Technology Development Group (ITDG).

Por otra parte, según este proceso de reconversión de la industria de la cal se fue ampliando y consolidando, comenzó a aparecer y crecer el problema del exceso de caliza subcalcinada, conocida como “hueso” en las caleras y “arena” en los centrales, lo cual es provocado por una baja conversión de carbonato en óxido de calcio, lo que implica un desaprovechamiento del combustible y un derroche de materia prima^[29,30].

Tabla 1.1.- Consumos de calor de diferentes tipos de hornos

N°	HORNOS	Consumo específico kJ / kg CaO
1	Horno Azbe de quemador central	3 726
2	Horno de la firma Beckenbach GMBH	3 768
3	Horno regenerativo de flujo paralelo	3 768
4	Horno con flujo de recirculación	5 024
5	Horno de la firma Chemstone	5 443
6	Horno del CBRI	5 652
7	Horno rotatorio	6 406
8	Horno ITDG de tiro forzado (Balaka)	6 908
9	Horno de la KVIC	6 992
10	Horno ITDG de tiro forzado (Chenkumbi)	8 156
11	Horno ITDG de tiro natural	10 090
12	Calera del CAI “Pepito Tey ”	12 711
13	Horno ITDG tradicional	19 636

Al estar contenida parte de esta caliza subcalcinada en el producto terminado, adicionalmente adultera su calidad, lo que ha obligado a la instalación de equipos no esenciales en la tecnología azucarera como son los desarenadores^[20], para tratar de reducir el impacto con que esa gran masa de caliza subcalcinada golpea a la industria azucarera. Actualmente en Cuba la cantidad de caliza subcalcinada que acompaña a la cal hidratada alcanza valores por encima del 30% del peso de

ésta^[20,47], en cambio, en otros países que producen cal como agente químico, este valor oscila entre 1.5 y 2%^[13,33,35]. De forma no tan evidente como lo anterior surge el problema de la afectación de la calidad de la cal por sobrecalcinación, debido a las excesivas temperaturas con que se trabaja en los hornos, producto de la ineficiencia, desconocimiento y descontrol técnico en esta industria, siendo conocido el hecho de los trastornos que estas cales crean en los centrales.

La relación entre la calidad de la cal y su consumo específico en la industria azucarera se muestra en la figura 1.2^[20].

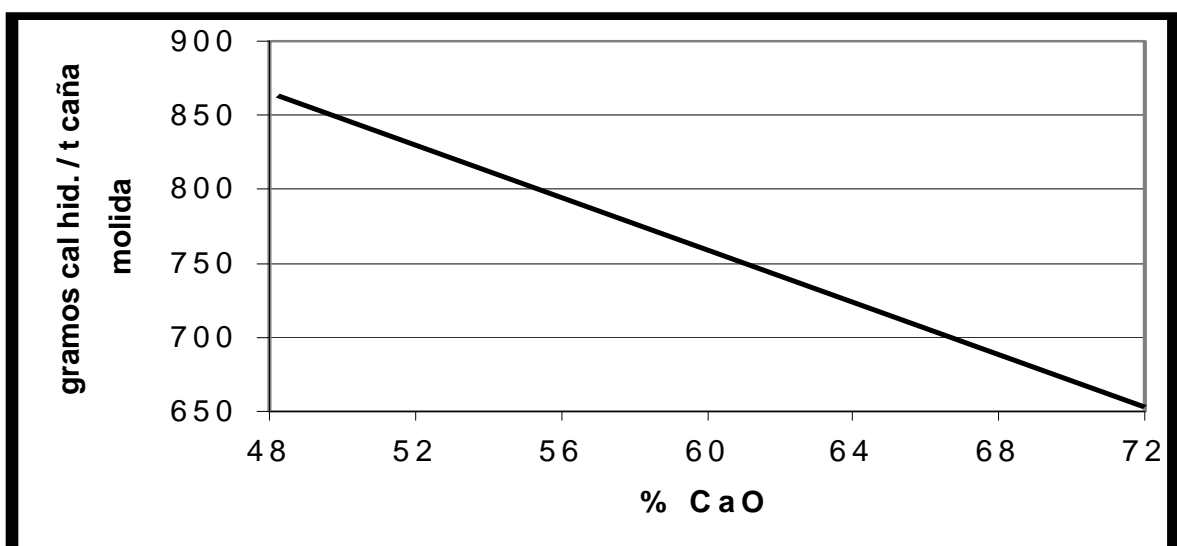


Figura 1.2: Consumo de cal en función de su calidad

Hay que significar que el gráfico de la figura anterior ha sido obtenido a partir de estudios de laboratorio, con jugos frescos de cañas maduras y sin contener materias extrañas, por lo que sólo puede emplearse como una indicación cualitativa de que la calidad de la cal es un factor más, no el único, con influencia en su consumo en los centrales.

La causas señaladas, entre otras, han contribuido al sostenido aumento del consumo específico de cal en los ingenios durante los últimos 18 años, sin que haya existido un aumento de la calidad del azúcar ni del recobrado en los centrales, tal como se muestra en la figura 1.3 ^[20]; esta situación ha obligado a una mayor producción de cal, con el consecuente aumento de los consumos de todo tipo y, por supuesto, el aumento de los costos de transportación y manipulación.

Según Ramón Castro Ruz ^[15] “... *El no haber vigilado la calidad de la cal industrial con destino a la industria azucarera le ha costado a la nación grandes pérdidas...*”.

Los efectos que los problemas relacionados con la calidad de la cal tienen sobre la industria azucarera, han sido tratados en la literatura especializada^[20].

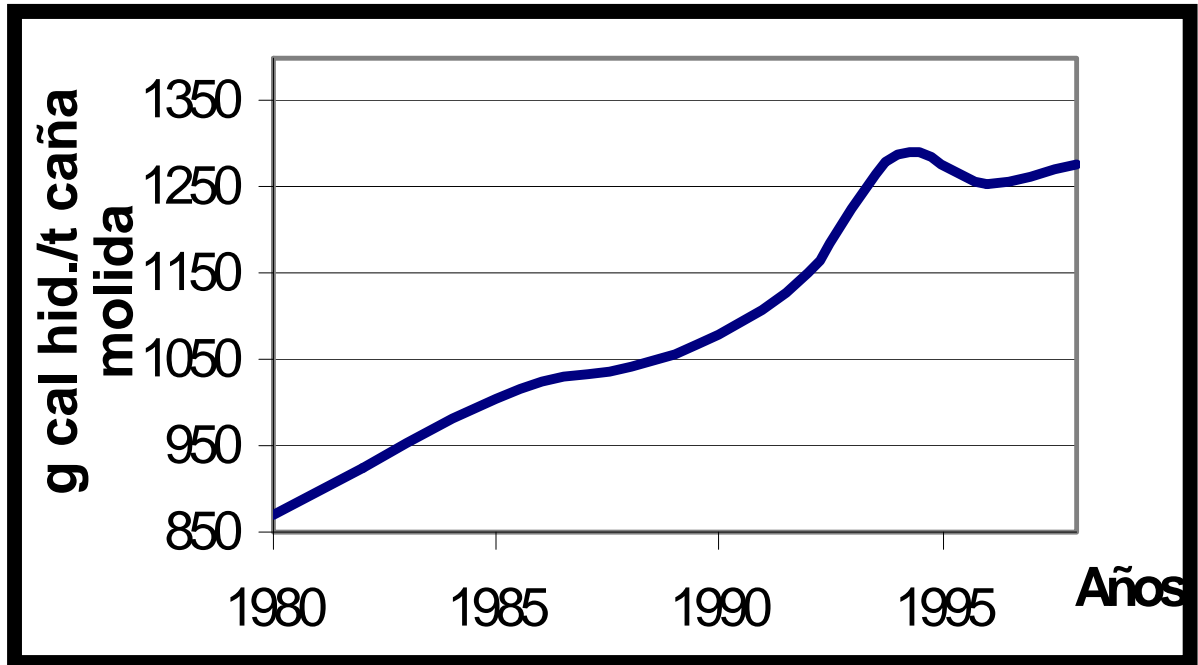


Figura 1.3: Evolución del consumo anual de cal en los ingenios.

El desarrollo de esta industria en Cuba ha estado condicionado sólo por la compra en el exterior, en su momento, de la tecnología y equipamiento requeridos para la reconversión tecnológica realizada, sin que se conozcan esfuerzos de investigación y desarrollo para la mejora de la eficiencia de esta industria, excepto el de Álvarez Borroto^[4], resultando este en un pobre trabajo por cuanto parte de bases erróneas para desarrollar una expresión para calcular la eficiencia térmica en hornos de cal.

La costosa simplicidad con que se desenvuelve esta industria en Cuba no tiene en cuenta conceptos primarios básicos, considerando los hornos sólo como el lugar “donde se le da candela a la piedra”^[27,74,76,78] y no como lo que verdaderamente son, reactores químicos donde ocurren interrelacionados complejos procesos tales como:

- ❖ La combustión del combustible

- ❖ La transferencia de calor de los gases a las rocas
- ❖ El precalentamiento y sobrecalentamiento de las rocas
- ❖ La disociación de los carbonatos
- ❖ Las pérdidas de calor

1.3.- La eficiencia térmica en hornos de cal

Todas las operaciones que se realizan en un horno de cal están encaminadas a la obtención económica de cal viva con la calidad requerida, es decir, están enfocadas a la ejecución de los tres procesos principales, el precalentamiento de las rocas hasta la temperatura de disociación, la disociación de los carbonatos contenidos en la caliza y el requerido sobrecalentamiento de la capa de cal formada para lograr un ritmo de producción económico. Estos procesos, en particular la disociación, sólo tienen lugar a partir de elevados consumos energéticos [6,13,57,61,65], por lo que la cantidad de calor consumido a partir de la energía liberada por el combustible quemado y transferida a la carga del horno, es un factor fundamental para lograr una producción económica y, a la vez, tiene una gran influencia sobre la calidad de la cal^[16,18,66]. Asociadas a esto, las pérdidas de calor de todo tipo tienen una gran influencia sobre la disponibilidad de éste para llevar a cabo los procesos principales, o en otras palabras, sobre los costos de producción, pues según se conoce, el costo del combustible utilizado en los hornos representa el 50 % de los costos de producción de cal hidratada^[13,17,60], razón por la que trabajar a temperaturas excesivas en

el horno implica un aumento de dichos costos; por otra parte, a pesar que desde el punto de vista de la velocidad de la reacción de disociación, lo más adecuado sería tener en el horno la máxima temperatura, en realidad esto no es posible porque existen límites para ésta impuestos por los daños que ocasiona a la calidad de la cal. Además del problema señalado, desde el punto de vista de las operaciones, tampoco es conveniente trabajar a excesivas temperaturas por cuanto debido a la presencia de impurezas en la caliza, el punto de fusión de ésta resulta apreciablemente más bajo que el del carbonato de calcio puro ^[13,80], lo que hace que después de las extracciones al horno, las rocas que continúan dentro, en incipiente estado de fusión por excesiva temperatura, se enfríen por la inevitable entrada de aire a temperatura ambiente y se unan en una masa única, lo que se conoce en las caleras como “horno colgado”^[13,77], provocando paradas en el horno que pueden durar muchas horas. Todo esto muestra la necesidad del más estricto control sobre el consumo de combustible^[42].

El cálculo de la eficiencia térmica en hornos de cal se realiza en el mundo utilizando la expresión clásica:

$$\eta_t = \frac{Q_d \cdot A_q}{Q_t} \times 100$$

donde:

Qd= requerimiento de calor para la disociación

Qt= cantidad total de calor suministrada al horno

Aq= porcentaje de óxido de calcio aprovechable en la cal viva

F= cantidad de combustible consumido en los hornos

V= valor calórico del combustible

Esta expresión es utilizada, y promovida su utilización, por varios autores^[21,32], Boynton^[13] dice, de forma explícita que “... *en el requerimiento teórico de calor no se incluye el requerimiento de calor para el calentamiento de la roca, solo el calor teórico requerido para la disociación, ya que aquel solo ocurre al poner en marcha el horno por primera vez puesto que durante la operación normal la recuperación de calor de los gases sirve predominantemente para calentar las sucesivas cargas...*”, de forma similar se expresa Bessey^[12]. Refiriéndose a ésta fórmula, el propio Boynton ^[13] escribió “... *Sin embargo, es necesaria mucha más información detallada que la suministrada por la fórmula precedente para definir las más importantes áreas de disipación de calor...*”.

Según Hougen^[35] “... *El rendimiento térmico o calorífico puede definirse como el porcentaje de calor aportado que efectivamente se utiliza de una forma deseada. Así definido el rendimiento térmico es convencional, dependiendo tanto de la designación de calor aprovechado como del calor que efectivamente se aprovecha. Un valor numérico del rendimiento térmico es indefinido a menos que se especifiquen estos dos términos... Un balance energético detallado da una descripción completa de la distribución y utilización de la energía. A partir de este balance puede hacerse cualquier interpretación que se desee relativa al rendimiento calorífico...*”.

En los trabajos de Ruch^[55], Schaefer^[57] y Thomas^[65] se analiza la fórmula clásica para el cálculo de la eficiencia térmica en hornos de cal partiendo de tener en cuenta ciertas características de los procesos que ocurren en su interior y cuyas consideraciones, de forma resumida, se exponen a continuación:

- ❖ El calor producido por la combustión está dentro de los límites de la temperatura de llama y la temperatura ambiente, pero solamente el calor a temperaturas por encima de la de disociación puede ser aprovechado por ésta, el resto es pérdida en la medida que se considere solamente el calor de reacción como calor utilizable, lo que se hace habitualmente para calcular la eficiencia térmica de los hornos de cal.
- ❖ Es evidente que la roca caliza tiene que ser calentada hasta la temperatura de reacción antes de la disociación, o sea, antes de que se pueda transformar en cal, por lo que es necesario también el calor por debajo de la temperatura de reacción para el precalentamiento, el que según la definición, no puede ser considerado como calor útil. Entonces surge la duda de que si la cantidad de calor liberado por la combustión, y que está disponible a temperaturas por debajo de la de disociación, resulta suficiente, en exceso o en defecto para cubrir la demanda requerida para el precalentamiento.
- ❖ Descontando las pérdidas inevitables del proceso y del equipamiento, el calor no utilizable después de la disociación se encuentra en la cal viva y en el dióxido de carbono producidos. El calor contenido en la

cal puede ser aprovechado precalentando el aire para la combustión y el calor del dióxido de carbono está disponible para el precalentamiento de las rocas calizas. Pero aquí surge la duda sobre como se relacionan la cantidad de calor del medio que lo cede y la capacidad de absorber calor del medio que lo recibe y como repercute la ganancia de calor indicada en el consumo de combustible.

Además de las consideraciones anteriores, se requiere de un suministro de calor adicional para sobrecalentar la capa de cal a temperaturas por encima de la de disociación, con el objetivo de mantener un ritmo comercial de producción. Este último aspecto tampoco es tenido en cuenta en la expresión clásica para el cálculo de la eficiencia térmica en hornos de cal, aún cuando la transferencia de calor para el sobrecalentamiento se realiza a temperaturas superiores a la de disociación.

De acuerdo con la óptica de Patterson^[50], la eficiencia térmica de un proceso industrial puede ser definida por la cantidad de calor requerida para producir una tonelada de producto, sin dejar de tener en cuenta si el calor anteriormente considerado como pérdida juega o no un papel en el proceso en cuestión.

Los trabajos sobre la eficiencia térmica de los autores citados son definitorios^[38,48,61] para aclarar que la fórmula tradicional y universalmente utilizada para el cálculo de éste parámetro, como plantea Ruch^[55], “... *resulta correcta como caso extremo teórico, pero en la práctica no conduce a nada más, por cuanto al establecer, por*

definición, que el calor de reacción para la disociación del carbonato de calcio es el límite para el consumo de calor, es decir, la máxima eficiencia térmica, no tiene en cuenta que debido a la importancia del consumo de combustible y el costo de éste, resulta importante conocer en que medida es posible reducirlos y donde están los límites reales de este consumo...”.

De los trabajos citados se concluye que la fórmula clásica de la eficiencia térmica de los hornos de cal no brinda suficiente información útil detallada para enfrentar la explotación y diseño de hornos reales, pero en ninguno de estos trabajos, ni en el resto de la bibliografía consultada, se propone una nueva expresión que permita una evaluación más efectiva de este importante parámetro.

Además de lo anteriormente descrito, la expresión clásica para el cálculo de la eficiencia térmica vincula forzosamente los aspectos energéticos y químicos de los procesos en los hornos mediante la inclusión del término A_q , de modo que establece una falsa relación entre el calor total suministrado al horno (FV), la supuestamente exclusiva demanda de calor (Q_d) requerida por el proceso y el resultado de la reacción (A_q), puesto que la reacción es provocada sólo por el calor absorbido por las rocas, tanto para la disociación, como para el precalentamiento para que ocurra aquella, como para el requerido sobrecalentamiento, y no por el calor total suministrado al horno, ya que en éste están incluidas las pérdidas de calor de todo tipo, las que no

juegan ningún papel en la reacción puesto que representan la parte del calor total no transferido a las rocas.

Más aún, la expresión clásica analizada no es aplicable siquiera a un horno idealizado en el que no ocurran pérdidas de calor, al que si se le suministra sólo la cantidad de calor requerida por la disociación, la eficiencia térmica no sería del 100%, como debería ser, puesto que al no considerar como útiles las cantidades de calor requeridas para el precalentamiento y el sobrecalentamiento, parte del calor suministrado para la disociación se invertiría en precalentar y sobrecalentar las rocas, por lo que la cantidad de carbonato de calcio disociado, no se correspondería con el calor suministrado al horno.

Por otra parte, el hecho de que la reacción de disociación es promovida por el calor absorbido por las rocas implica que, el grado de utilización del calor por los procesos en las rocas tiene influencia sobre el consumo de combustible, lo que puede definirse como efectividad térmica del proceso, y tiene además una influencia directa sobre el rendimiento de la reacción de disociación y sobre el % CaO aprovechable obtenidos. Esto muestra que hay dos aspectos involucrados en esto: el energético y el químico, sin embargo, en la bibliografía consultada no se encuentran referencias de trabajos realizados para estudiar los vínculos entre ambos aspectos, a pesar de los efectos que esta relación tiene sobre el consumo de combustible y los resultados de la reacción.

Hasta la fecha, se emplea sólo la eficiencia térmica como único elemento para evaluar el consumo de combustible, estableciendo una

inexistente relación directa entre ambos, sin tener en cuenta que también la efectividad térmica del proceso toma parte en la influencia sobre dicho consumo, ya que la totalidad del calor suministrado al horno es consumido tanto por las pérdidas como por el proceso, aspectos sobre los que tiene un gran influencia el esquema o variante de explotación de los hornos, las operaciones que se realizan durante su explotación, las características de las rocas y de los gases de combustión.

Entonces, es posible establecer que tanto la eficiencia térmica de los hornos de cal, como la efectividad térmica del proceso de calcinación de calizas, son importantes aspectos relacionados con el consumo de combustible, pero en la bibliografía consultada no se encuentran referencias de que sean tenidos en cuenta los dos, en relación con el consumo de combustible, particularmente el segundo, por cuanto, como se ha dicho, no ha sido definido anteriormente.

1.4.- Análisis del control operacional sobre el consumo de combustible y materia prima en el proceso de producción de cal

En la Introducción de este trabajo se hace referencia a la información requerida para ejercer un control efectivo sobre el consumo de combustible y materia prima en un determinado proceso, la que está constituida por los datos ofrecidos por la instrumentación instalada y por los resultados analíticos brindados por el laboratorio y por los

indicadores del comportamiento de las etapas del proceso, dados por los correspondientes cálculos de rendimientos y eficiencias.

La importancia de la instalación y funcionamiento de la instrumentación requerida y de un trabajo adecuado del laboratorio está fuera de discusión en cualquier industria en el mundo por lo que no se discutirá en este trabajo, aunque resulta necesaria una breve referencia a estos aspectos en relación con la actualidad de las caleras cubanas^[46].

En la bibliografía consultada no se encuentran referencias sobre la existencia y utilización en otros países de expresiones que permitan el cálculo de los requeridos indicadores, fundamentándose el control operacional exclusivamente en los datos brindados por los análisis del laboratorio y la instrumentación ^[19,39,34,37,54] y la introducción de sofisticados medios automáticos en países con alto grado de desarrollo^[36,38,57,70], excepto en lo tocante al nada claro intento de cálculo de diagnóstico hecho por Spiropoulos ^[62] y al cálculo de la eficiencia térmica, efectuado éste último a partir de la fórmula clásica descrita anteriormente. Este enfoque del problema del control operacional de la producción de cal hidratada muestra el porqué no ha sido tratada en la literatura la importante relación entre el aspecto energético y los resultados del proceso.

Al estudiar, la bibliografía consultada^[19,28,41], respecto a la utilización de los más modernos sistemas de controles automáticos utilizados por la industria de la cal en varios países del mundo, se puso en claro que los datos brindados por la instrumentación y el laboratorio sirven,

ciertamente, a los operadores para la explotación del equipamiento de producción, lo que demanda constante concentración en el trabajo, respuestas inmediatas y coordinación entre las diferentes áreas de la fábrica, razones por las cuales en la industria de países con suficientes recursos financieros existe una fuerte tendencia a la automatización de los procesos.

En cambio, tanto los indicadores del desempeño de las etapas como otro tipo de información, no es utilizada por los operadores en la ejecución de su trabajo, sino por el personal técnico-ejecutivo, quienes para tomar las decisiones más importantes que afectan al proceso, analizan las jornadas diarias teniendo en cuenta los costos, los volúmenes y calidad de la producción, las roturas y la efectividad de las reparaciones y de las soluciones dadas a diversos trastornos, los efectos de soluciones anteriores, los consumos de materia prima y energía, y por supuesto los datos de la instrumentación y analíticos. Pero si en el análisis diario del personal técnico-ejecutivo no se incluyen los indicadores referidos a las eficiencias y rendimientos de las etapas principales del proceso, no se realiza un análisis integral de la problemática industrial; esto conduce a tomar decisiones con un determinado nivel de incertidumbre, en cuanto a su alcance y efectividad, el que pudiera reducirse al incluir los indicadores de desempeño de las etapas de producción sistemáticamente en el análisis diario de producción.

La utilización de expresiones para el cálculo de los indicadores de desempeño, junto con los datos analíticos y de instrumentación, permite

estructurar un método de control operacional más efectivo, y en caleras con alto grado de automatización, permite además valorar el grado de eficacia de ésta.

A partir del estudio de la bibliografía existente sobre el tema^[56,58,62,66,72,73] en este trabajo ha sido posible establecer que, desde el punto de vista del aprovechamiento de combustible y materia prima, la economía en la producción de cal incluye seis aspectos principales:

1. La reducción del tamaño del rajón de voladura y la calibración de la roca alimentada al horno, mediante molienda y tamizado. Por cuanto en esta etapa se pierde materia prima en la corriente de desperdicios
2. La disociación del carbonato de calcio contenido en la roca caliza para la obtención de óxido de calcio por, ya que este es quien le da valor al producto terminado, el que también contiene caliza subcalcinada, la que representa tanto un derroche de materia prima como de combustible, dado este por el calor absorbido por las rocas sin llegar a la temperatura de disociación, lo que representa varios cientos de grados.
3. La recuperación del hidrato de calcio en la operación de clasificación, debido a que la caliza subcalcinada presente en el producto terminado es un adulterante de la calidad de éste, y la presencia de óxido de calcio en los desperdicios representa una pérdida de la materia prima y del combustible consumido en obtenerlo.

4. El aprovechamiento del combustible en la operación de los hornos, puesto que las pérdidas de calor, debidas en gran parte a malas operaciones de los hornos, representan una pérdida de combustible.
5. El esquema de explotación de los hornos, el cual tiene un gran influencia sobre el consumo de combustible, a partir del grado de reducción de las pérdidas de calor mediante diversas posibilidades de recuperación del calor perdido por diferentes conceptos.
6. El grado de aprovechamiento del calor por el proceso, pues éste determina la cantidad de carbonato de calcio disociado y por tanto el aprovechamiento de la materia prima, así como de la parte del combustible correspondiente al calor absorbido por las rocas.

El nivel alcanzado en la ejecución de cada uno de los seis aspectos anteriores puede conocerse mediante el cálculo de los correspondientes indicadores, a saber:

1. La eficiencia de la operación de la unidad de molienda y tamizado
2. El rendimiento de la reacción de disociación
3. La eficiencia de la operación de clasificación
4. La eficiencia térmica de los hornos
5. El coeficiente de efectividad térmica

Todos los puntos anteriores dependen, finalmente, de las operaciones diarias y de las modificaciones introducidas a la tecnología instalada. Así, no es posible establecer un buen control operacional sobre el proceso, ni evaluar los resultados de cualquier modificación introducida si no se tienen en cuenta los cinco parámetros señalados.

Por otra parte, como sustento general de la realidad que enfrenta actualmente la producción de hidrato de cal destinado como agente químico a los centrales azucareros, en todas las caleras del MINAZ solo existe una sola variante de explotación de los hornos, la cual es, increíblemente, la explotación de estos sin ningún tipo de recuperación de calor. No se necesita ningún tipo de demostración para saber que esta es la alternativa de explotación de hornos más antieconómica posible y, sin embargo, no se conoce de ningún esfuerzo por analizar otras variantes más económicas y sustentables. En la bibliografía consultada no se encuentran referencias de trabajos realizados para analizar esquemas de explotación de los hornos, lo cual tiene también influencia tanto sobre los resultados económicos de la fábrica, como sobre la calidad de la cal producida. Esto puede también suceder porque las investigaciones al respecto desarrolladas por compañías privadas no se publican, porque de hacerlo, afectarían la competitividad de la compañía. En relación con este aspecto, puede decirse que esta es una situación que limita el desarrollo del conocimiento en un área tan compleja como es la calcinación de rocas en hornos de cuba vertical, pues cualquier análisis de variantes de explotación de hornos, pasa por el desarrollo de balances energéticos, los cuales están basados en la Primera Ley de la Termodinámica, para conocer la realidad del aprovechamiento de calor por el proceso o, lo que es lo mismo, el grado en que se pierde el calor en el proceso en cuestión. Este enfoque dado por la

aplicación de la Primera Ley en la realización de los balances energéticos, aunque es útil en si mismo, no arroja luz sobre todas las aristas del problema por cuanto no permite conocer los límites reales existentes para el aprovechamiento del calor por el proceso. Esto último solo es posible lograrlo mediante el desarrollo de balances exergéticos, lo cual se realiza mediante la aplicación conjunta de los principios recogidos en la Primera y Segunda Ley de la Termodinámica y la comparación y análisis de los resultados de los balances energéticos y exergéticos.

Pero al no conocerse de la realización de estos balances energéticos, entonces, no pueden ser utilizados como referencia para la comparación con balances exergéticos.

Hay que destacar que en la literatura se encuentran ecuaciones para evaluar la eficiencia de la unidad de molienda y tamizado^[13,36], ya que debido a la amplia utilización de estos equipos en las industrias vinculadas al procesamiento de rocas, existe un desarrollo en este sentido. De igual manera, existen ecuaciones para el cálculo de la eficiencia de equipos separadores de sólidos atendiendo a su grado de finura^[13], utilizadas en industrias como la del cemento, la que además tiene muchos puntos comunes con la industria de la cal, pero no se encuentran ecuaciones de este tipo que, en lugar del grado de finura de los materiales en la mezcla, tengan en cuenta la composición química del sólido.

1.5.- Conclusiones del capítulo

1.5.1.- En la literatura consultada se reporta solo un estudio integral^[48] de la interrelación entre los datos analíticos, de la instrumentación, indicadores de desempeño y resultados del proceso, limitándose el resto a estudios parciales, que no abordan en ningún caso los indicadores de desempeño.

1.5.2.- No se han desarrollado ecuaciones para el cálculo de las eficiencias y rendimientos de las etapas con influencia marcada sobre la economía de la producción de cal, excepto en relación con la unidad de molienda y tamizado y la fórmula clásica para el cálculo de la eficiencia térmica, resultando ésta última insuficiente para tal propósito.

1.5.3.- Excepto en una referencia ^[48], se ha relacionado de forma absoluta la eficiencia térmica de los hornos de cal, tanto con los resultados de la reacción de disociación como con el consumo de combustible, lo que conduce a una apreciación no adecuada de la realidad operacional, del esquema de explotación y de diseño de hornos.

1.5.4.- Excepto en una referencia ^[48], no se han encontrado estudios sobre la efectividad térmica del proceso de calcinación de calizas, ni tampoco de la relación existente entre ésta y los resultados de la reacción de disociación, por lo que de forma general, en el mundo, se desconoce de la utilización y utilidad de este indicador.

1.5.5.- No se han encontrado referencias sobre balances energéticos de variantes de esquemas de explotación de los hornos de cuba vertical para la calcinación de rocas calizas, lo cual sería un paso adelante en el conocimiento sobre esta temática.

1.5.6.- No se han encontrado referencias sobre propuestas de análisis de esquemas de explotación de hornos de cuba vertical mediante la comparación de resultados de balances energéticos y exergéticos.

CAPITULO 2. Fundamentos del modelo físico del balance energético de cuatro alternativas de explotación de hornos de cuba vertical para la producción de cal.

El trabajo en este capítulo está encaminado a desarrollar un modelo físico-matemático para explicar los complejos problemas de transferencia de calor presentes en la calcinación de calizas, lo cual permitirá sustentar científicamente el enfoque del balance energético que se desarrollará posteriormente, a través de la definición de las relaciones de causa y efecto existentes entre los aspectos químicos y energéticos del proceso.

También se muestran y explican las expresiones de cálculo de los indicadores requeridos para, de conjunto con los datos analíticos y de la instrumentación, estructurar un método que permita desarrollar el balance energético de alternativas de esquemas de explotación de hornos de cuba vertical para la calcinación de rocas calizas, especialmente enfocado sobre el consumo de combustible y materia prima. En particular, se trata de las expresiones que permiten calcular tanto la eficiencia térmica de los hornos de cal bajo una nueva óptica del problema, como la efectividad térmica del proceso, debido a la influencia que tienen sobre el aprovechamiento tanto del combustible como de la materia prima, los que resultan ambos recursos naturales no renovables.

2.1.- Balance de materiales

En la figura 2.1 se muestran las cuatro operaciones básicas para la producción de cal hidratada, a partir de la cual se ha desarrollado un balance de materiales ^[48] para obtener las expresiones para el cálculo de la eficiencia de la unidad de molienda y tamizado, el rendimiento de la reacción de disociación y la eficiencia de la operación de clasificación.

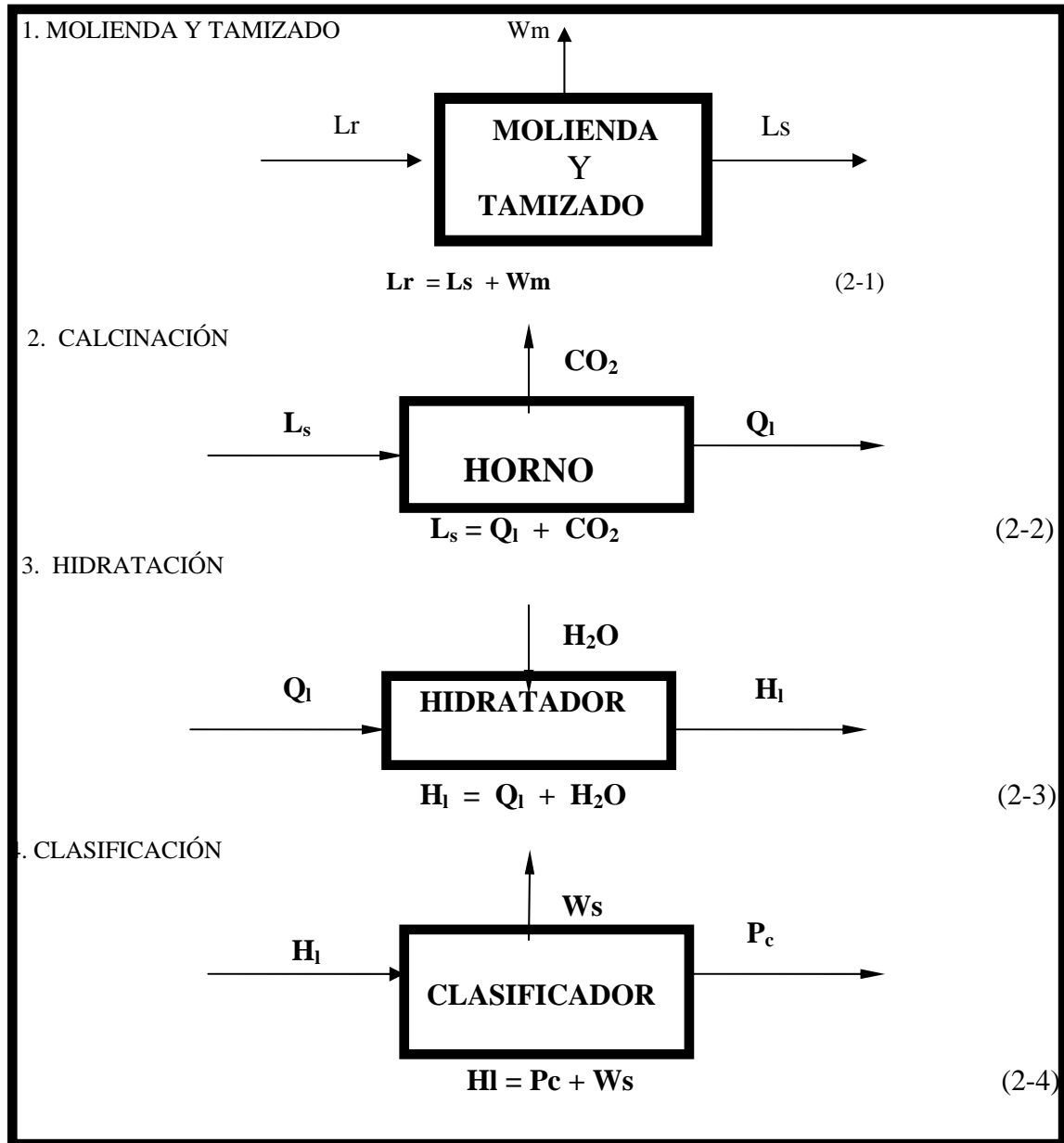


Figura 2.1: Balance de materiales en las operaciones básicas para la producción de cal hidratada.

2.2.- Análisis de los factores con influencia sobre la eficiencia de la operación de calcinación en los hornos

En los hornos se establecen complejas relaciones de causa y efecto, porque en ellos están involucrados los aspectos energético y químico del proceso, dependiendo los resultados de ambos, individualmente, de varios factores propios, pero a la vez existe una relación entre ambos aspectos de modo que los resultados del segundo son influenciados por el primero. Teniendo presente la idea anterior, se realiza a continuación el correspondiente análisis de los factores que tienen influencia sobre cada uno de los aspectos nombrados y sobre la relación entre ellos.

2.2.1.- El aspecto químico

Todas las operaciones que se hacen en el horno están encaminadas a la máxima obtención de óxido de calcio, por lo que este aspecto queda caracterizado por el porcentaje de óxido de calcio que se obtenga en la cal viva, a partir del correspondiente valor del rendimiento de la reacción de disociación como medida de la eficiencia de este aspecto del proceso, lo que se calcula según la expresión **2-24** desarrollada en otro trabajo anterior^[48].

2.2.2.-El aspecto energético

Para conocer el perfil del campo de temperaturas en una roca caliza sometida a calcinación en hornos de cal, se desarrolla el siguiente modelo físico de tal proceso

2.2.2.1.- Modelo físico

Diversos estudios sobre la calcinación de rocas calizas en forma de esferas^[24,30,38], han comprobado que la disociación comienza en la superficie exterior, y avanza radialmente hacia el centro con una interfase cal-caliza perfectamente definida.

En el modelo expuesto en la figura 2.2 se considera inicialmente una esfera de roca caliza de radio r , la que en su descenso a través del horno se va calentando desde la temperatura T_{s1} hasta alcanzar la temperatura de disociación T_d en toda su masa^[44,45], debido al calor transferido desde los gases de combustión en ascenso hacia la parte superior del horno.

A partir de que la roca alcanza la temperatura T_d , en la superficie comienza la disociación, la que avanza radialmente hacia el centro en una interfase en reacción perfectamente definida, creciendo la capa de cal viva que se va formando. Para vencer la resistencia de la creciente capa de cal, de espesor δ , es necesario entonces continuar elevando la temperatura superficial de ésta hasta el nuevo valor T_{s2} , de modo que a la interfase en reacción llegue la cantidad de calor demandada por la disociación, la que alcanzará el centro de la roca, a partir de un continuo suministro de calor, lo que provoca que la temperatura superficial alcance un nuevo valor T_{s3} . El dióxido de carbono liberado por la disociación de los carbonatos en la interfase cal-caliza en reacción, está en ese punto a la temperatura de disociación y absorbe parte del calor suministrado a la cal, elevando su temperatura, a su paso hacia el exterior a través de la porosa capa de cal formada.

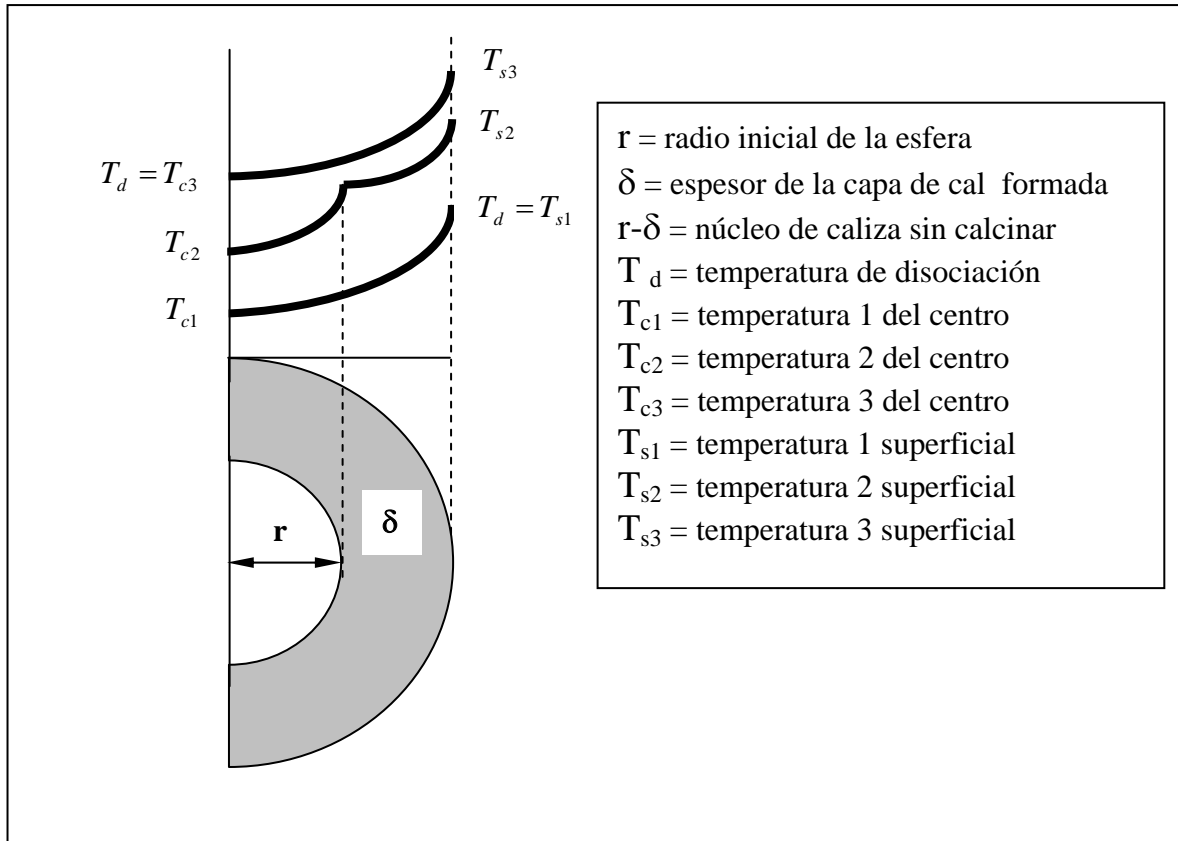


Figura 2.2: Modelo físico de la calcinación de una esfera de caliza

Aunque no es objetivo de este trabajo el desarrollo de un modelo matemático para la explicación de los fenómenos que ocurren durante la calcinación de calizas, resulta necesario tener en cuenta ciertas consideraciones.

La determinación de la temperatura del gas puede considerarse como un problema unidimensional de transferencia de calor en estado estacionario, en cambio, en la piedra resulta un problema unidimensional de transferencia de calor en estado no estacionario con complicadas condiciones de contorno.

En las zonas de calentamiento y enfriamiento del horno no ocurre ninguna reacción química, es decir no hay sumidero de calor, entonces

lo que sucede en estas zonas está descrito por las ecuaciones clásicas de la conducción del calor en estado no estacionario cuyas soluciones son conocidas.

Del análisis de estos fenómenos resultan complicadas condiciones de proceso y de contorno tales como transferencia de calor en estado transitorio, la existencia de un sumidero de calor representado por el calor requerido para que ocurra la reacción, una frontera móvil representada por la interfase en reacción moviéndose hacia el centro de la roca y, por último, el flujo desde la interfase en reacción hacia la superficie externa del dióxido de carbono liberado por la reacción de disociación, el que se calienta a su paso a través de la capa porosa de cal formada.

Para poder desarrollar un modelo matemático que explique la disociación de calizas durante el proceso de calcinación, varios investigadores han asumido determinadas consideraciones, tales como despreciar el efecto del calentamiento del CO_2 liberado por la reacción^[48], no tener en cuenta el requerido sobrecalentamiento de la capa de cal formada^[48], no considerar la movilidad de la interfase cal-caliza^[48], etc., todo lo cual ha conducido a soluciones no satisfactorias del problema planteado^[48].

Por otra parte, en todos los trabajos anteriores estudiados se trabaja sobre esferas de caliza con el fin de hacer menos complejos y laboriosos los procedimientos matemáticos para la solución del problema planteado, pero esta consideración hace que las soluciones sean de

alcance limitado por cuanto no toman en cuenta otras geometrías de las rocas.

Debido a que una vez que comienza la reacción, en la inicialmente homogénea roca caliza se comienza a formar una capa de cal viva rodeando al núcleo sin calcinar, se distinguen claramente dos materiales distintos por sus propiedades físico-químicas, separados por la interfase en reacción. Por tanto, el planteamiento del problema del desarrollo de un modelo matemático para explicar la disociación de la caliza resulta en extremo complicado y engorroso.

El núcleo sin calcinar se va calentando por conducción desde la temperatura T_{s1} , T_{s2} , T_{s3} hasta que en la interfase cal-caliza se alcanza la temperatura de disociación T_d , ocurriendo allí la reacción. Esto significa que debido al movimiento de la interfase en reacción hacia el centro de la roca, se conforma un problema de transferencia de calor con frontera móvil, elemento que no ha sido tenido en cuenta, o despreciado, en trabajos anteriores y que introduce una complejidad adicional en la solución del problema planteado.

El planteamiento del anterior modelo matemático sustenta las ideas expresadas en el acápite 1.3 en relación con lo que debe ser considerado como calor útil durante la calcinación de calizas en hornos de cal, lo que sirve como base para la formulación de una expresión para calcular la eficiencia térmica en hornos de cal más objetivamente que empleando la expresión actualmente utilizada para tal fin.

De lo anterior se aprecia que la eficiencia térmica de un horno de cal es una caracterización puramente energética sin ninguna relación con los resultados de la reacción de disociación, aún cuando en la bibliografía consultada, se consideran relacionados mediante la inclusión del % de óxido de calcio aprovechable en la cal viva (Aq) en la expresión de cálculo de la eficiencia térmica de los hornos.

2.2.2.2.- La eficiencia térmica en hornos de cal

Bajo condiciones reales no todo el calor suministrado al horno es consumido por el proceso, ya que una parte se pierde por las ineficiencias intrínsecas del equipamiento instalado^[7,9,14], y, por supuesto, por el esquema existente de explotación de los hornos, perdiéndose el resto por las ineficiencias operacionales en la conducción del horno^[48]. Las ineficiencias intrínsecas representan el límite que es posible alcanzar por la reducción de las ineficiencias operacionales, por lo que el cálculo sistemático de la eficiencia térmica permite conocer el grado de eficacia con que está trabajando el horno, quedando implícitas las ineficiencias intrínsecas, las que solo variarán, y por tanto solo serán detectadas por el cálculo, a partir de modificaciones introducidas en el equipamiento o por el cambio del esquema de explotación de los hornos.

En un horno operando bajo condiciones reales es preciso suministrar calor a las rocas para precalentarlas hasta la temperatura de disociación para que ocurra la reacción con la extensión deseada, puesto que de no

ser precalentadas, parte del calor suministrado para la disociación se consumiría en el precalentamiento, no alcanzando entonces la reacción la extensión esperada. Pero además, en un horno real es preciso suministrar calor para sobrecalentar la capa de cal formada para mantener un ritmo comercial de producción^[13,48], por lo que de acuerdo con lo anterior y lo expresado en el acápite 1,3 en relación con los procesos reales requeridos para que ocurra la reacción en los hornos de cal, hay que considerar el calor demandado por el precalentamiento y el sobrecalentamiento como calor útil, además del demandado por el proceso de disociación^[48]. De lo anterior se concluye que la cantidad total de calor (Qt) suministrado a un horno de cal se consume en cuatro direcciones, a saber:

- Por el requerimiento de calor (Qph) para el precalentamiento de la caliza
- Por el requerimiento de calor (Qoh) para el sobrecalentamiento de la capa de cal formada
- Por el requerimiento de calor (Qd) para la disociación
- Por la pérdidas de calor (Qp) de todo tipo

De acuerdo con^[67] esto es:

$$Q_t = Q_{ph} + Q_{oh} + Q_d + Q_p = FV \quad (2-5)$$

donde:

F= cantidad de combustible consumido

V= valor calórico del combustible

Entonces, de acuerdo con los puntos de vista sostenidos anteriormente sobre lo que debe ser considerado como calor útil, para el cálculo de la eficiencia de los hornos de cal se ha propuesto^[48] la siguiente expresión:

$$\eta_T = \frac{Q_{ph} + Q_{oh} + Q_d}{Q_t} \times 100 \quad (2-6)$$

Lo que establece diferencias notables con respecto a la expresión clásica para realizar este cálculo:

$$\eta_t = \frac{Q_d \cdot A_q}{Q_t} \times 100 \quad (2-7)$$

donde:

η_T \Rightarrow eficiencia térmica del horno según la expresión propuesta

η_t \Rightarrow eficiencia térmica del horno según la expresión clásica

2.2.3.- La relación entre los aspectos químico y energético en los hornos de cal

El vínculo entre los aspectos químico y energético de la calcinación de calizas en hornos de cal está dado por la relación entre la cantidad calor total absorbido por las rocas para que ocurra la reacción de disociación y los resultados de ésta. Este vínculo lo caracteriza la efectividad térmica del proceso, entendida como la fracción porcentual que representa la cantidad de calor empleada en la disociación respecto a la cantidad total de calor absorbido por las rocas.

2.2.3.1.- La efectividad térmica del proceso

La efectividad térmica del proceso depende de las características químico-físicas de las rocas, de la temperatura de operación de los hornos dada por la temperatura de llama, de la temperatura de sobrecalentamiento de las rocas dada por el tiempo de residencia de éstas en la zona de calcinación y del rendimiento de la reacción de disociación.

Como la cantidad total de calor absorbido por las rocas para que ocurra la reacción está compuesta por los requerimientos de calor para el precalentamiento, para la disociación y para el sobrecalentamiento de la capa de cal formada, y designando coeficiente de efectividad térmica del proceso de calcinación al valor de la relación porcentual entre el calor demandado por la disociación y el calor total absorbido por las rocas, e identificándolo mediante la letra γ , entonces, según^[48] la expresión que lo describe es:

$$\gamma = \frac{Q_d}{Q_{ph} + Q_{oh} + Q_d} \times 100 \quad (2-8)$$

Entonces, a partir de las ecuaciones 2-35^[48] y 2-37^[48], es posible desarrollar una expresión que defina la relación entre el consumo de combustible, la eficiencia térmica del horno y la efectividad térmica del proceso según:

$$\eta_T \cdot Q_t = Q_{ph} + Q_{oh} + Q_d = \frac{Q_d}{\gamma} \Rightarrow \eta_T \cdot Q_t = \frac{Q_d}{\gamma} \Rightarrow Q_t = \frac{Q_d}{\gamma \eta_T} \Rightarrow FV = \frac{Q_d}{\gamma \eta_T}$$

entonces:

$$F = \frac{Q_d}{\gamma \eta_T V} \quad (2-9)$$

2.4.- Cálculos de los requerimientos teóricos de calor

Para el cálculo tanto de la eficiencia térmica del horno como de la efectividad térmica del proceso, es preciso establecer los requerimientos de calor de las tres etapas descritas, lo que se hace a continuación teniendo en cuenta las correspondientes expresiones del balance de materiales mostrado en el trabajo anteriormente citado^[48].

2.4.1.- Cálculo del requerimiento teórico de calor para la disociación.

De acuerdo con el calor de formación de los constituyentes del carbonato de calcio^[48], el calor de disociación de éste es 1 831 642 J/kg CaCO₃. Entonces, de acuerdo con^[48], la cantidad teórica de calor (Qd) requerida para disociar determinada cantidad de carbonato de calcio (Cc1) es:

$$Qd = 1831\ 642 (Cc1) \quad (2-10)$$

Sustituyendo (2-8) en la ecuación anterior:

$$Qd = 1831\ 642 \left(\frac{Ox}{0,56} \right) = 3\ 270\ 789 (Ox)$$

Sustituyendo el término correspondiente de la ecuación (2-13)^[48] en la ecuación anterior:

$$Qd = 3\ 270\ 789 Pc.Ah \left(\frac{Ap - Aw}{Ah - Aw} \right) \quad (2-11)$$

2.4.2.- Cálculo del requerimiento de calor para el precalentamiento.

La caliza (L_s) es alimentada al horno a la temperatura del medio ambiente (t_s). Entonces, para calentar la caliza hasta la temperatura de disociación (t_d), según^[48] el requerimiento teórico de calor es:

$$Q_{ph} = L_s C_{p_{L_s}} (t_d - t_e) \quad (2-12)$$

Sustituyendo (2-19)^[48] en la ecuación anterior:

$$Q_{ph} = P_c A_h \left(\frac{A_p - A_w}{A_h - A_w} \right) \left(0,785 + \frac{1}{A_q} \right) C_{p_{L_s}} (t_d - t_e) \quad (2/13)$$

2.4.3.- Cálculo del requerimiento de calor para el sobrecalentamiento.

A fin de alcanzar un ritmo de producción económicamente sostenible, en un horno real se necesita sobrecalentar la capa de cal formada, la que rodea la caliza que está siendo calcinada, a una temperatura (t_{oh}) superior a la temperatura de disociación de acuerdo con^[48]:

$$Q_{oh} = Q_l C_{p_{Q_l}} (t_{oh} - t_d) \quad (2-14)$$

de acuerdo con la ecuación (2-13):

$$Q_l = P_c \frac{A_h}{A_q} \left(\frac{A_p - A_w}{A_h - A_w} \right)$$

sustituyendo la ecuación anterior en (2-43):

$$Q_{oh} = P_c \frac{A_h}{A_q} \left(\frac{A_p - A_w}{A_h - A_w} \right) C_{p_{Q_l}} (t_{oh} - t_d) \quad (2-15)$$

2.5.- Conclusiones del capítulo

2.5.1.- En este capítulo se desarrolla un modelo físico para explicar los complejos problemas de transferencia de calor presentes en la operación de hornos de cuba vertical, el cual tiene en cuenta los requerimientos reales de calor, lo que constituye el sustento científico de la nueva expresión matemática para el cálculo de la eficiencia térmica de estos hornos y de la efectividad térmica del proceso de calcinación de calizas.

2.5.2.- En este capítulo se muestran y explican las expresiones de cálculo de los indicadores requeridos para estructurar un método que permita desarrollar el balance energético de alternativas de esquemas de explotación de hornos de cuba vertical para la calcinación de rocas calizas, especialmente enfocado sobre el consumo de combustible y materia prima.

2.5.3.- La utilización en la industria de las expresiones desarrolladas, no requiere de inversiones, ni de mediciones ni análisis especiales, pues están basadas en los datos de rutina que debe llevar cualquier calera, por lo que su introducción en la práctica resulta fácil y económica.

Nomenclatura utilizada

- Ah: % CaO aprovechable en la cal hidratada
- Ap: % CaO aprovechable en el producto terminado
- Aq: % CaO aprovechable en la cal viva
- Aw: % CaO aprovechable en los desperdicios de la clasificación
- B: % CaCO_3 en caliza
- Cc1: Masa de carbonato de calcio disociada
- Cp_{LS}: Calor específico de la caliza ($\text{kJ}/^\circ\text{kg } ^\circ\text{C}$)
- Cp_{Q1}: Calor específico de la cal viva ($\text{kJ}/^\circ\text{kg } ^\circ\text{C}$)
- F: Litros de combustible consumido
- H1: Masa de cal hidratada producida
- Lr: Masa de caliza alimentada a la unidad de molienda y tamizado(kg)
- Ls: Masa de caliza alimentada a los hornos (kg)
- O_x: Masa de óxido de calcio obtenida
- Pc: Masa de producto terminado (kg)
- Qd: Cantidad de calor requerido para la disociación (kJ)
- Q1: Masa de cal viva producida (kg)
- Qoh: Cantidad de calor requerido para el sobrecalentamiento (kJ)
- Qph: Cantidad de calor requerido para el precalentamiento (kJ)
- Qt: Calor total suministrado al horno (kJ)
- Q_T: Calor total absorbido por las rocas en el horno (kJ)
- Rd: Rendimiento de la reacción de disociación (%)
- td: Temperatura de disociación ($^\circ\text{C}$)

t_e : Temperatura medioambiental ($^{\circ}\text{C}$)

t_{oh} : Temperatura de sobrecalentamiento ($^{\circ}\text{C}$)

t_{ph} : Temperatura de precalentamiento ($^{\circ}\text{C}$)

V : Valor calórico inferior del combustible (kJ/kg)

W_m : Masa de desperdicios de la unidad de molienda y tamizado

W_s : Masa de desperdicios de la clasificación (kg)

γ : Coeficiente de efectividad térmica (%)

η_m : Eficiencia de la unidad de molienda y tamizado (%)

η_s : Eficiencia de la clasificación (%)

η_t : Eficiencia térmica del horno según la expresión clásica (%)

η_T : Eficiencia térmica del horno según la expresión propuesta (%)

Capítulo 3.- Balance energético de hornos de cuba vertical para la producción de cal hidratada.

3.1.- Horno idealizado

Se parte de considerar un horno en el que no existan pérdidas de calor teniendo en cuenta los tres procesos requeridos para la transformación de la caliza en cal viva, es decir, el precalentamiento, el sobrecalentamiento y la disociación.

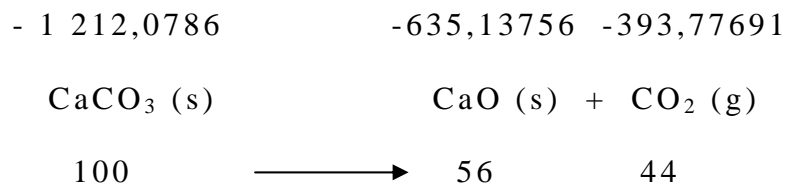
El calor requerido para el precalentamiento de la caliza se calcula según la expresión:

$$Q = m C_p \Delta t$$

Así, 1 tonelada de carbonato de calcio cuyo calor específico es 0,83 kJ/kg-⁰C a 27⁰C e introducido al horno a esa temperatura inicial, para calentarlo hasta la temperatura de disociación del carbonato de calcio, 898 ⁰C , requiere de una cantidad de calor:

$$Q = 1 \times 0,83 (898 - 27) = 722\,930 \text{ kJ} / t \text{ CaCO}_3$$

En la siguiente ecuación representativa de la reacción de disociación, se muestran en la parte superior de cada sustancia sus calores de formación (J/mol) y en la parte inferior las correspondientes masas atómicas



Calculando el calor de reacción del carbonato de calcio a partir de los calores de formación de las sustancias involucradas en la disociación:

$$-635,13756 - 393,77691 - (-1212,0786) = 1831,642 \text{ J/mol CaCO}_3$$

$$1831,642 \text{ J/mol CaCO}_3 = 1831642 \text{ kJ/t CaCO}_3$$

A partir de saber que el CaO producido equivale al 56 % en peso de la materia prima:

Calor para el precalentamiento:

$$722930 \left(\frac{100}{56} \right) = 1290946 \text{ kJ / t CaO}$$

Calor para la disociación:

$$1831642 \left(\frac{100}{56} \right) = 3270789 \text{ kJ / t CaO}$$

Durante la operación de un horno industrial no es posible calcinar a 898 °C, ya que el tiempo requerido para la calcinación sería muy largo, aunque tampoco es aconsejable exceder un cierto valor máximo de temperatura a causa del peligro de obtención de un producto de baja calidad por sobrecalcinación. En la mayor parte de la literatura [7,8,9,12,13,14,18,19,32,36,38,39,41,etc.] se señala este máximo alrededor de los 1200 °C para obtener una aceptable calidad de cal dentro de un razonable período de tiempo. Como una consecuencia de lo anterior, la cal originalmente obtenida a 898 °C debe sobrecalentarse hasta 1200 °C, siendo a esta temperatura su calor específico 0,535 kJ/kg °C y el requerimiento adicional de calor para el sobrecalentamiento, se calcula como:

$$Q = 1000 \times 0,535 (1200 - 898) = 161570 \text{ kJ / t CaO}$$

Resumiendo todos los requerimientos de calor obtenidos:

Calentamiento	------(Q _{ph})-----	1 290 946 kJ/t CaO
Disociación	------(Q _d)-----	3 270 789 kJ/t CaO
Sobrecalentamiento	------(Q _{oh})-----	161 570 kJ/t CaO
Total	------(Q _T)-----	4 723 305 kJ/t CaO

Como el calor demandado por el sobrecalentamiento y por la disociación es un calor que se transfiere a alta temperatura, solo es posible disponer de él a partir de quemar combustible, por lo que la cifra del requerimiento total de combustible (F_c), cuyo VCI es 39 942 kJ/kg demandado por estos dos procesos es:

$$F_c = \frac{3\,432\,359}{39\,942} = 85,93 \text{ kg } f - o / t \text{ CaO}$$

3.1.1.-Cálculo de, η_T , η_t y γ : A partir de las expresiones desarrolladas anteriormente se calcularán η_T y γ para cada una de las variantes analizadas.

$$\eta_T = \frac{1\,290\,946 + 161\,570 + 3\,270\,789}{4\,723\,305} = 100 \%$$

$$\eta_t = \frac{3\,270\,789}{4\,723\,305} \times 100 = 69,24 \%$$

$$\gamma = \frac{3\,270\,789}{4\,723\,305} \times 100 = 69,24 \%$$

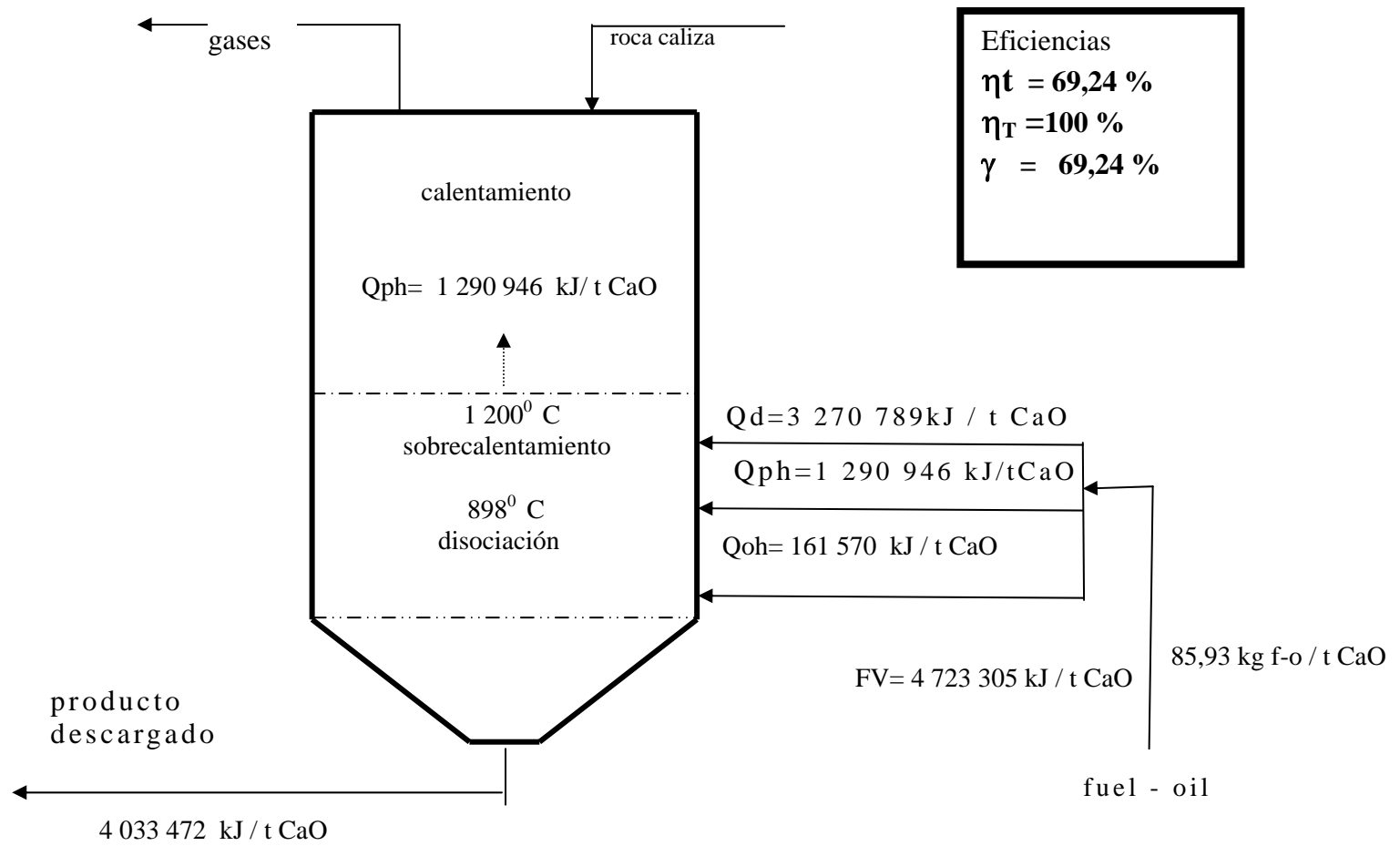


Figura 3.1 Horno idealizado

3.2.- Horno sin recuperación de calor

Desafortunadamente, el calor desarrollado en la combustión para el procesamiento de la materia prima no puede ser utilizado exclusivamente solo en los requerimientos del proceso. Las pérdidas de calor se hallan ubicadas en tres lugares:

- en la cal descargada
- a través de las paredes del horno
- en los gases de salida

3.2.1.- Pérdidas de calor a través de las paredes del horno

Las pérdidas de calor en un horno de cuba vertical para la producción de cal pueden estimarse en $2\ 655\ \text{kJ/h-m}^2$ [60]. En el Anexo II se muestra un plano de los hornos de cuba verticales actualmente utilizados por el MINAZ, los que tienen 3,6 metros de diámetro y 11,285 metros de altura, por lo que la superficie exterior de cada horno expuesta al calor es de $128\ \text{m}^2$, lo que significa que las pérdidas de calor por este concepto pueden alcanzar:

$$128 \times 2\ 655 = 339\ 795\ \text{kJ/h} = 8,5\ \text{kg f - o/h} = 204,17\ \text{kg f - o/día}$$

Considerando que un horno de las dimensiones acordadas produce alrededor de 15 t cal/día:

$$\frac{204,17}{15} = 13,6\ \text{kg f - o/t CaO} = 543\ 211\ \text{kJ/tCaO}$$

3.2.2.- Pérdidas de calor en el producto descargado

Después de la calcinación, el producto pasa a la zona de enfriamiento a unos $1\ 200\ ^\circ\text{C}$, donde cede calor al medio

exterior el que se considera a una temperatura de 27 °C. La cantidad de calor que contiene el material descargado es:

$$Q = 1000 \times 0,715 (1200 - 27) = 838\,695 \text{ kJ} / t \text{ CaO}$$

Esta cantidad de calor representa una cantidad de combustible calculada como:

$$\frac{838\,695}{39\,942} = 20,90 \text{ kg } f - o / t \text{ CaO}$$

3.2.3.- Pérdidas de calor con los gases de salida

La alta temperatura a que ocurren tanto la disociación como el sobrecalentamiento hace que el calor específico de los gases sea 1,297kJ/kg-°C. Por otra parte, cuando se quema fuel-oil utilizando 11,49 kg aire/kg f-o, la temperatura de llama es de alrededor de 2000 °C [49,51,58], por lo que la transferencia de calor será entre esta temperatura y la de la caliza sobrecalentada, 1200 °C, lo que implica además que esta será también la temperatura mínima con que los gases abandonarán la zona de calcinación. Sabiendo que la cantidad de calor requerida para las etapas de calcinación y sobrecalentamiento es de 3 432 359 kJ/t CaO, la cantidad de gases requerida para la transferencia de calor se calcula como:

$$3\,423\,359 = X (1,297)(2\,000 - 1\,200)$$

$$X = 3\,299 \text{ kg gases de combustión} / t \text{ CaO}$$

Como cada kg de fuel-oil produce 12,49 kg de gases de combustión:

$$\frac{3\,299}{12,49} = 264,1 \text{ kg } f - o / t \text{ CaO} = 10\,548\,682 \text{ kJ} / t \text{ CaO}$$

La cantidad de aire requerido para la combustión es:

$$264,1 \times 11,49 = 3\,034 \text{ kg aire} / \text{tCaO}$$

La cantidad total de gases que abandonan la zona de calcinación está compuesta por los gases de la combustión más el dióxido de carbono producto de la disociación:

$$3\,299 + 440 = 3\,739 \text{ kg gases totales} / \text{t CaO}$$

Después de haber sobrecalentado la roca y haber provocado la disociación, la cantidad de calor con los gases que abandonan la zona de calcinación es:

$$Q = 3\,739 (1,214) (1\,200 - 27) = 5\,324\,418 \text{ kJ} / \text{t CaO}$$

Después de la etapa de precalentamiento, estos gases abandonan el horno con una cantidad de calor que provoca una pérdida de:

$$5\,324\,418 - 1\,290\,946 = 4\,033\,472 \text{ kJ} / \text{t CaO} = 100,98 \text{ kg f-o} / \text{t CaO}$$

La temperatura de los gases de salida será entonces;

$$Q = 3\,739 (1,214) (X - 27) = 4\,033\,472$$

$$X = 915 \text{ } ^\circ\text{C}$$

3.2.4.- Cálculo de η_T , η_t y γ :

$$\eta_T = \frac{1\,290\,946 + 161\,570 + 3\,270\,789}{10\,548\,682} = 44,29\%$$

$$\eta_t = \frac{3\,270\,789}{10\,548\,682} \times 100 = 31,00 \%$$

$$\gamma = \frac{3\,270\,789}{4\,723\,305} \times 100 = 69,24 \%$$

3.2.5.- Cálculo de la relación de consumo de combustible (ΔF_c) respecto al horno idealizado:

$$\Delta F_c = (264,1 \text{ kg f-o} / \text{t CaO} / 85,93 \text{ kg f-o} / \text{t CaO}) \cdot 100 = 307,34 \%$$

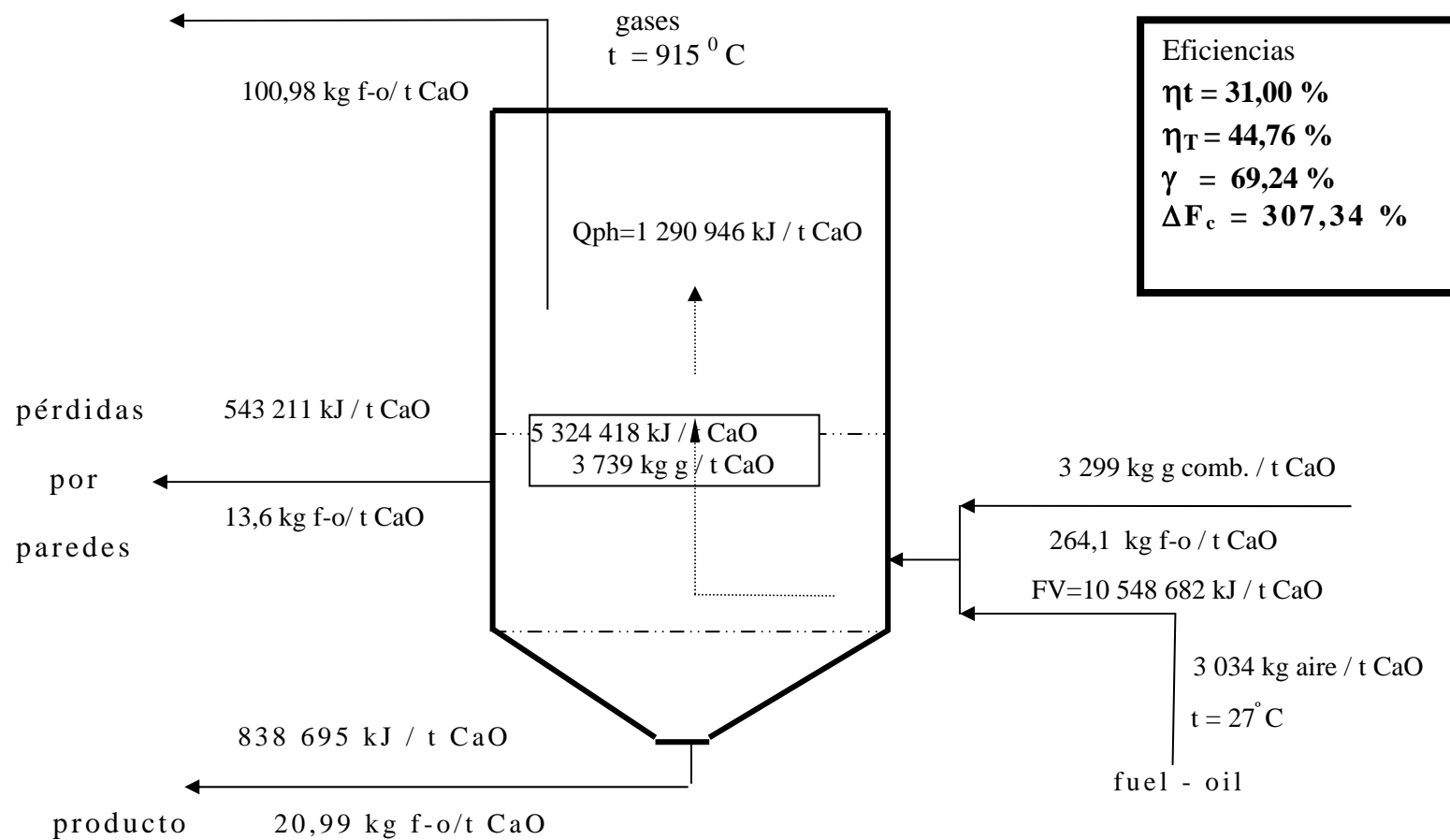


Figura 3.2 Horno sin recuperación de calor

3.3.- Horno con recuperación del calor del producto descargado

Considerando un 50 % de recuperación del calor en el producto descargado, el ahorro de combustible se calcula como sigue:

$$838\,695 \left(\frac{50}{100} \right) = 419\,348 \text{ kJ} / t \text{ CaO} = 10,50 \text{ kg f-o} / t \text{ CaO}$$

Esto significa que se requieren 10,50 kg f-o/t CaO menos para calentar el aire, lo que provoca una serie de efectos que se describen y calculan a continuación:

- Reducción del consumo de fuel-oil

$$264,1 - 10,50 = 253,6 \text{ kg f-o} / t \text{ CaO} = 10\,129\,291 \text{ kJ} / t \text{ CaO}$$

- Reducción de la cantidad de aire requerido

$$253,6 \times 11,49 = 2\,914 \text{ kg aire} / t \text{ CaO}$$

- Aumento de la temperatura del aire

$$Q = 2\,914 (1,004)(X - 27) = 419\,348$$

$$X = 170 \text{ }^\circ\text{C}$$

- Reducción de la cantidad total de gases

$$2\,914 + 253 + 440 = 3\,607 \text{ kg gases} / t \text{ CaO}$$

- Reducción de la cantidad de calor en los gases que salen de la zona de calcinación

$$Q = 3\,607 (1,214)(1\,200 - 27) = 5\,136\,447 \text{ kJ} / t \text{ Cao}$$

- Reducción de la cantidad de calor perdida con los gases de salida

$$5\,136\,447 - 1\,290\,946 = 3\,845\,501 \text{ kJ} / t \text{ CaO} = 96,2 \text{ kg f-o} / t \text{ CaO}$$

- Reducción de la temperatura de los gases de salida

$$Q = 3\,607 (1,214)(X - 27) = 3\,845\,501$$

$$X = 905 \text{ }^\circ\text{C}$$

3.3.1.- Cálculo de η_T y γ :

$$\eta_T = \frac{1\,290\,946 + 161\,570 + 3\,270\,789}{10\,129\,291} = 46,62 \%$$

$$\eta_t = \frac{3\,270\,789}{10\,129\,291} \times 100 = 32,29 \%$$

$$\gamma = \frac{3\,270\,789}{4\,723\,305} \times 100 = 69,25 \%$$

3.3.2.- Cálculo de ΔF_c :

$$\Delta F_c = (253,6 \text{ kg f-o / t CaO} / 85,93 \text{ kg f-o / t CaO}) \cdot 100 = 295,12 \%$$

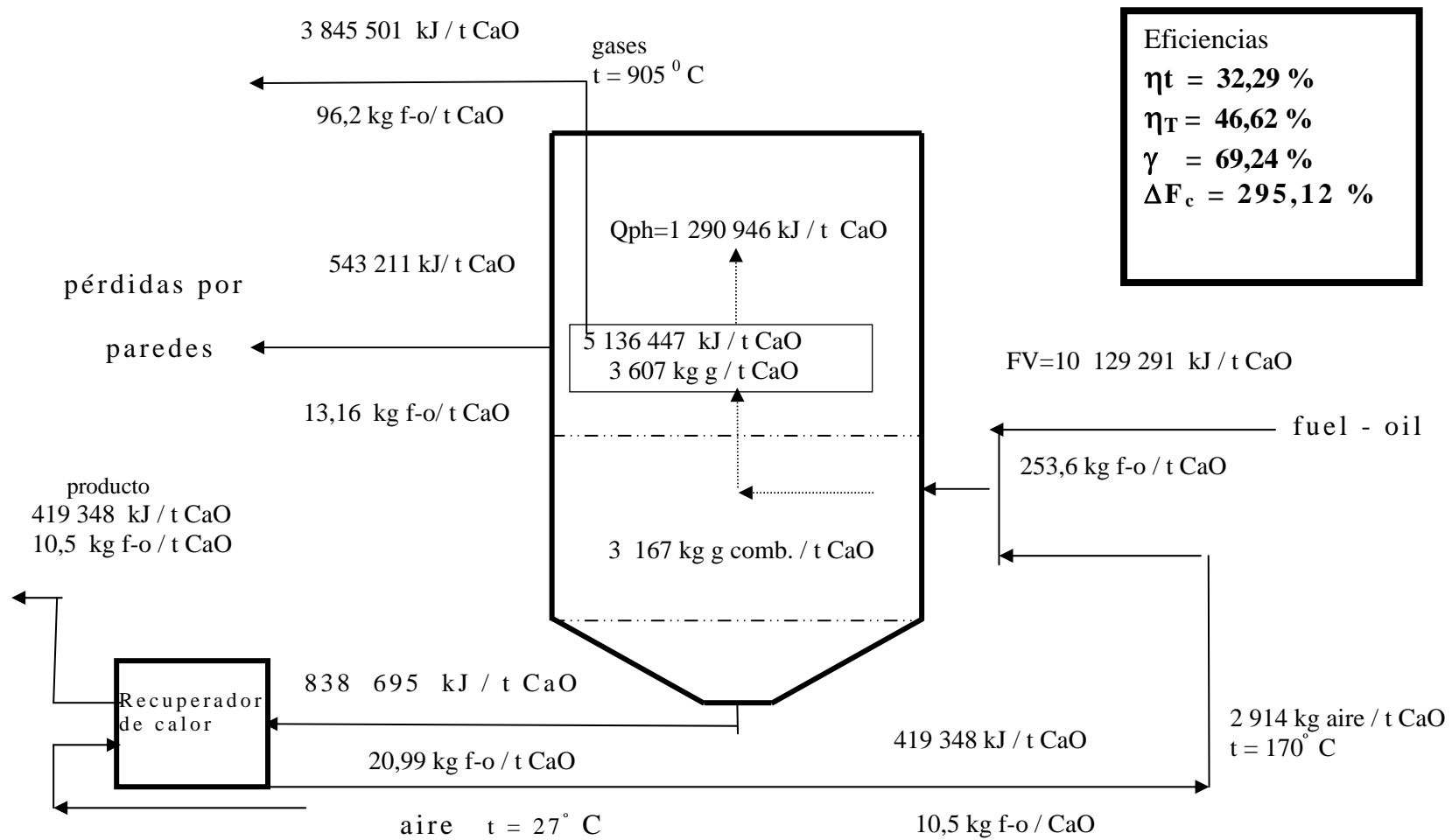


Figura 3.3 Horno con recuperación de calor del producto descargado

3.4.- Horno con recuperación de calor del producto descargado y de los gases de salida

Para estas condiciones que colocar a continuación del enfriador de cal un intercambiador de calor de los gases, empleando como fluido a calentar el aire que sale precalentado del enfriador de cal. Cuando comienza a funcionar por primera vez el sistema completo de recuperación de calor, los gases que salen del horno a 905°C contienen 3 845 501 KJ/t CaO; el aire que entra al intercambiador de calor tiene una temperatura de 170°C, por lo que la cantidad de calor posible de ser recuperada para esta condición inicial se calcula como sigue:

$$Q = 3\,607 (1,214) (905 - 170) = 3\,218\,490 \text{ kJ} / t \text{ CaO}$$

Recuperando solo el 30% de esta cantidad de calor:

$$3\,218\,490 \left(\frac{30}{100} \right) = 965\,547 \text{ kJ} / t \text{ CaO} = 24,17 \text{ kg } f - o / t \text{ CaO}$$

El nuevo calentamiento del aire provoca una serie de efectos que se describen y calculan a continuación;

- Reducción de las pérdidas en los gases

$$3\,845\,501 - 965\,547 = 2\,236\,256 \text{ KJ} / t \text{ CaO} = 55,98 \text{ kg } f - o / t \text{ CaO}$$

- Reducción del consumo de fuel-oil

$$253,6 - 24,17 = 229,43 \text{ kg } f - o / t \text{ CaO} = 9\,163\,893 \text{ kJ} / t \text{ CaO}$$

- Reducción de la cantidad de aire requerido para la combustión

$$229,43 \times 11,49 = 2\,636 \text{ kg } \text{aire} / t \text{ CaO}$$

- Aumento de la temperatura del aire

$$Q = 2\,636 (1,004) (X - 170) = 965\,549$$

$$X = 535 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Reducción de la cantidad total de gases

$$2\,636 + 229 + 440 = 3\,305 \text{ kg gases / t CaO}$$

- Reducción de la cantidad de calor en los gases que salen de la zona de calcinación

$$Q = 3\,305 (1,214) (1\,200 - 27) = 4\,706\,393 \text{ kJ / t CaO}$$

- Reducción de la cantidad de calor de gases de salida del horno

$$4\,706\,393 - 1\,290\,946 = 3\,415\,447 \text{ kJ / tCaO} = 85,51 \text{ kg f - o / t CaO}$$

- Reducción de la temperatura de los gases de salida del horno

$$Q = 3305(1,214)(X - 27) = 3\,415\,447$$

$$X = 851 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- Reducción de las pérdidas de calor con los gases que abandonan el intercambiador de calor

$$3\,415\,447 - 965\,547 = 2\,449\,900 \text{ kJ / tCaO} = 38,05 \text{ kg f - o / tCaO}$$

- Reducción de la temperatura de los gases de salida del intercambiador de calor

$$Q = 3\,305 (1,214) (X - 27) = 2\,449\,900$$

$$X = 638 \text{ } ^\circ\text{C}$$

3.4.1.-Cálculo de η_T y γ :

$$\eta_T = \frac{1\,290\,946 + 161\,570 + 3\,270\,789}{9\,163\,893} = 51,53 \%$$

$$\eta_t = \frac{3\,270\,789}{9\,163\,893} \times 100 = 35,69 \%$$

$$\gamma = \frac{3\,270\,789}{4\,723\,305} \times 100 = 69,24 \%$$

3.4.2.- Cálculo de ΔF_c :

$$\Delta F_c = (229,43 \text{ kg f-o / t CaO} / 85,93 \text{ kg f-o / t CaO}) \cdot 100 = 266,99 \%$$

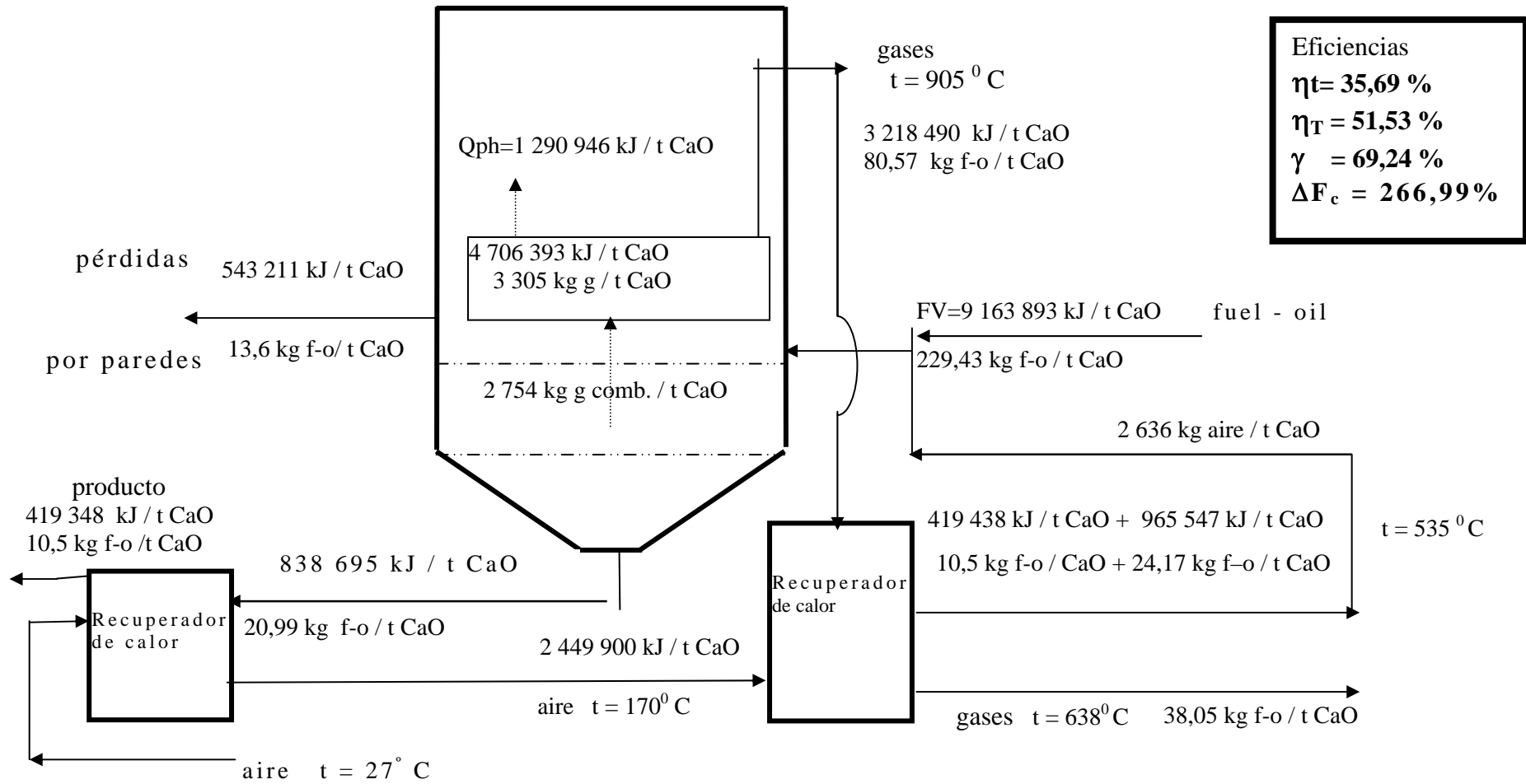


Figura 3.4 Horno con recuperación de calor del producto descargado y de los gases de salida.

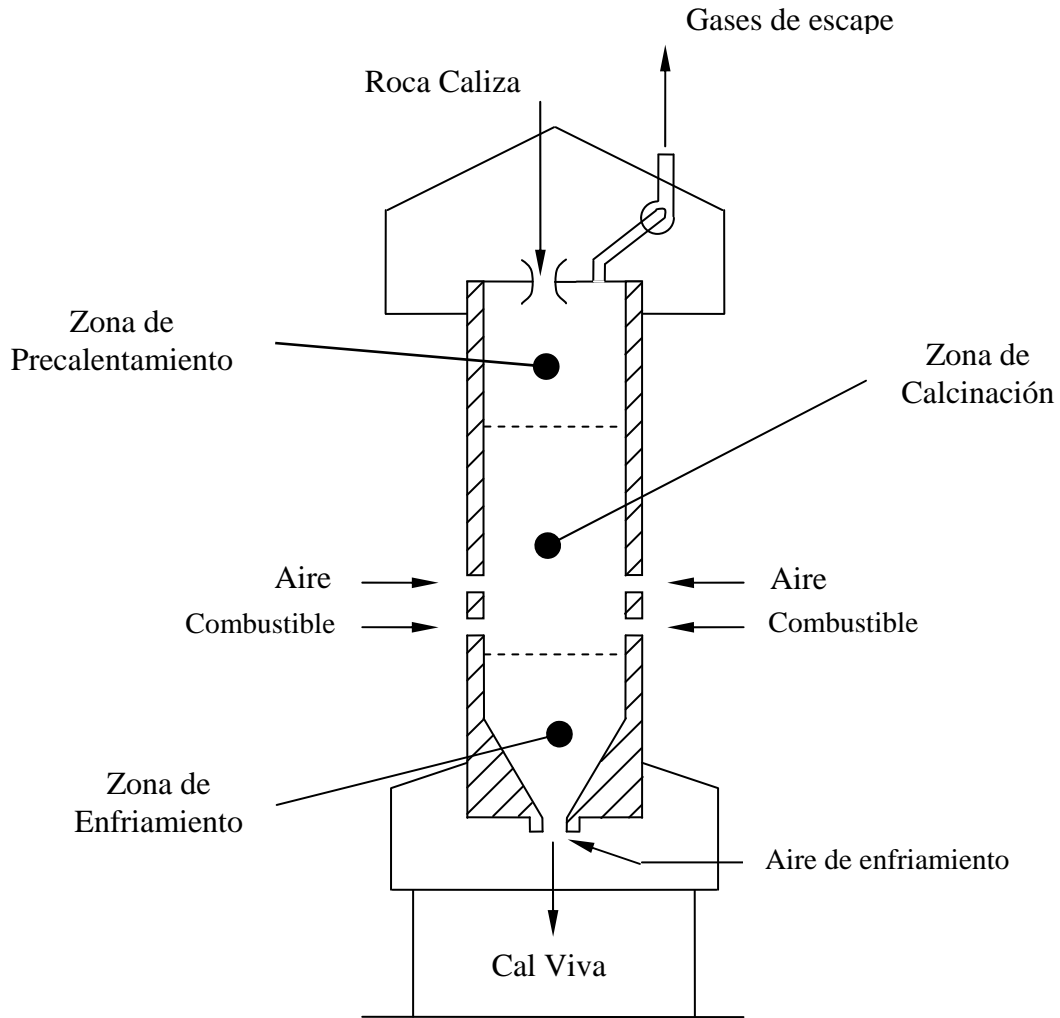


Figura 3.5 Esquema de un horno de cuba vertical

3.5.- Análisis de los resultados

Los cálculos realizados ponen de manifiesto la influencia directa que tiene el esquema de operación empleado sobre la eficiencia térmica^[13,14,39,41,48,56], por cuanto ésta es afectada por las pérdidas de calor

Al considerar como calor útil para el proceso las cantidades de calor requeridas por el precalentamiento y el sobrecalentamiento, además del calor para la disociación, es posible entonces apreciar la influencia que tienen sobre el consumo de combustible y, por tanto, conocer donde

están los límites reales de la eficiencia térmica. Además de la consideración anterior, y a partir de tener en cuenta las temperaturas y calores específicos de las sustancias envueltas en el proceso durante los cálculos hechos, se responde a las dudas expresadas por Ruch^[55], Schaefer^[57] y Thomas^[65] en cuanto a las capacidades de dar y recibir calor de las sustancias involucradas y conocer en que medida se ve afectada la eficiencia térmica por estas capacidades.

En cuanto al coeficiente de efectividad térmica, éste permanece constante en todas las variantes, lo que demuestra que no depende ni de la eficiencia térmica ni de las pérdidas de calor. El análisis de los recuadros de la figuras 3.1, 3.2, 3.3 y 3.4, muestra que el valor $\gamma=69,24\%$ permanece prácticamente constante en cualquiera de las variantes estudiadas, tanto en el caso ideal donde se suministra solamente el calor teórico requerido por el proceso y donde no hay pérdidas de calor, como en las variantes más reales donde estas pérdidas existen, haya o no recuperación de calor. Esto es debido a varias razones, en primer lugar a que la temperatura de sobrecalentamiento se toma constante en 1 200 °C, es decir, no se derrocha combustible elevando excesivamente la temperatura de la roca.

En segundo lugar, al ser constante la composición de la roca, 100% de carbonato de calcio en el caso estudiado, es constante el calor específico de la capa de cal viva formada, siendo entonces constante la influencia de este factor sobre el consumo de calor.

En tercer lugar, en el análisis hecho se considera constante, e igual en todas las variantes estudiadas, la velocidad de descarga del horno, por lo que la influencia de este factor sobre el aprovechamiento de calor por las rocas es la misma en todos los casos.

3.6.-Conclusiones del capítulo

3.6.1.- En este capítulo se ha mostrado de forma práctica la utilización de las expresiones requeridas para el cálculo de la eficiencia térmica de los hornos y de la efectividad térmica del proceso de calcinación de calizas en hornos de cuba vertical para la producción de cal hidratada.

3.6.2.- Mediante el desarrollo de balances energéticos, se ha demostrado cuantitativamente la influencia que tiene el esquema de explotación de los hornos sobre el consumo de combustible (ΔF_c) y, por tanto, sobre la rentabilidad de fábricas de cal.

3.6.3.- Mediante el desarrollo de balances energéticos, se ha comprobado que la eficiencia térmica de los hornos de cal, calculada según la expresión clásica o la propuesta en este trabajo, son afectadas ambas por el esquema de explotación de los hornos, por cuanto están relacionadas con las pérdidas de calor vinculadas al correspondiente esquema de explotación.

3.6.4.- Se ha comprobado que la expresión clásica analizada no es aplicable siquiera a un horno idealizado en el que no ocurran pérdidas de calor, al que si se le suministra sólo la cantidad de calor requerida por la disociación, la eficiencia térmica no sería del 100%, como

debería ser, puesto que al no considerar como útiles las cantidades de calor requeridas para el precalentamiento y el sobrecalentamiento, parte del calor suministrado para la disociación se invertiría en precalentar y sobrecalentar las rocas, por lo que la cantidad de carbonato de calcio disociado, no se correspondería con el calor suministrado al horno.

3.6.5.- Se ha comprobado que la efectividad térmica del proceso no es afectada por el esquema de explotación de los hornos, por cuanto está relacionada con el grado de aprovechamiento del calor absorbido por las rocas y no con las pérdidas de calor del horno.

Conclusiones generales

1. Se caracterizó la problemática actual de la producción de cal en Cuba y en el mundo, con particular énfasis sobre el trabajo de los hornos de cuba vertical, donde se pone de manifiesto el desconocimiento actualmente existente sobre estos aspectos.
2. Se realizó un análisis crítico del trabajo de los hornos de cal y sobre los indicadores para medir el desempeño de estos equipos, destacándose el hecho de que actualmente solo se utiliza la expresión clásica para el cálculo de la eficiencia térmica, y más ningún otro indicador, con las limitaciones que crea su utilización. .
3. A partir del modelo físico desarrollado, se realizó un análisis crítico del trabajo de los hornos de cal y sobre la calcinación

4. Se realizó un análisis de la influencia del esquema de explotación de los hornos sobre indicadores de desempeño, donde se demuestra:
5. La influencia del esquema de explotación sobre la eficiencia térmica, utilizando cualquier expresión, por ser esta un indicador puramente energético.
6. El esquema de explotación de los hornos no tiene influencia sobre la efectividad térmica del proceso, por cuanto este es un indicador relacionado con el aspecto químico del proceso, es decir está relacionado con el grado de aprovechamiento del calor absorbido por las rocas y no con las pérdidas de calor del horno.
7. El esquema de explotación de los hornos tiene una influencia directa sobre el consumo de combustible, por cuanto este esquema decide sobre la magnitud de las pérdidas de calor del proceso de calcinación de calizas.

Recomendaciones

1. Utilizar los resultados de los balances energéticos realizados para el desarrollo de estudios posteriores más avanzados, como es el caso de los balances exergéticos, para aumentar en conocimiento en el campo de la calcinación de calizas en hornos de cuba vertical.

2. Publicar los resultados alcanzados para divulgar una herramienta que permitirá tomar decisiones más acertadas sobre la utilización de diversas variantes de explotación de los hornos, con conocimiento de las causas que originan las desviaciones de los parámetros con influencia sobre la rentabilidad de esta producción, y la cuantificación de estas desviaciones.

BIBLIOGRAFIA

1. Comandante en Jefe Fidel Castro Ruz, Discurso pronunciado en el XI Forum de Ciencia y Técnica, La Habana, Diciembre,1996.
2. Informe Central al V Congreso del Partido Comunista de Cuba, Editora Política, La Habana, 1998.
3. Resolución Económica del V Congreso del Partido Comunista de Cuba, Editora Política, La Habana, 1998.
4. Álvarez Borroto, R., Benítez Cortés, I., Martínez Robaina, M.A., Eficiencia térmica y calidad de la cal de la fabrica “Noel Fernández”, Centro Azúcar , (2) 7, 1999
5. Azbe, V.J., Increasing the Capacity of Lime Kilns with Induced Draft Fans, Rock Products, 44 (11), 34, 1941.
6. Azbe, V.J., Economical Manufacture of Quality Lime, Rock Products, 48 (8-10), 81, 92, 102, 1945.
7. Azbe,V.J., Efficient Methods of Manufacturing Chemical Lime, Rock Products, 50 (9), 86, 1947.
8. Balazsovics, G., Theoretical Investigation on Heat and Mass Transfer in Lime Burning, Radex Rundschau, # 1, 434, 1959.
9. Balazsovics, G., Effect of Heat Transfer on Efficiency of Burning Zone of Lime Shaft Kiln, ZKG, 12 (10), 466, 1959.
10. Balazsovics, G., Effect of the Calcining Losses of Burnt Lime on the Dimensions on Designing of Lime Kilns, Radex Rundschau, # 5, 324, 1970.

11. Beckenbach, K., Annular Shaft Kiln Save Fuel Costs, Rock Products, 74 (7), 68, 1971.
12. Bessey, G.E., Production and Use of Lime in Developing Countries, Overseas Building Notes # 61, April, 1975.
13. Boynton, R.S., Chemistry and Technology of Lime and Limestone, 532 pp., John Wiley & Sons, New York, 1988.
14. Brzakovic, P., Problems of Determining Lime Kiln Thermal Efficiency, Chem. Abstracts, 82 (8), Abst. # 47191, 1975.
15. Castro Ruz, R., Problemas Fundamentales a Solucionar en la Industria Azucarera, 81 pp., Ediciones Verde Olivo, La Habana, 1996.
16. Chopra, S.K., Large Scale Manufacture of Lime, National Consultation on Development of Lime and Lime-Pozzolana Industries, New Delhi, India, 1997
17. Comentarios sobre la información recibida acerca de la cal en Europa y el mundo de la Asociación Europea de la Cal, Centro Técnico para el Desarrollo de los Materiales de Construcción, Ediciones Geo, La Habana, 1998.
18. Dave, N.G., et al. Some Recent Investigations on Design and Performance of Indian Lime Kilns, National Consultation on Development of Lime-Pozzolanas Industries, New Delhi, India, 1996.
19. Duarte Jorge, A.M., Nogueira, E., The New Itaú de Minas Lime Plant in Brazil, ZKG, 47 (11)627-630, Germany, 1994.
20. Falcón Piedra, F., Importancia de la Cal en la Fabricación del Azúcar de Caña, 11pp., Imprenta MINAZ, La Habana, 1995.

21. Fay, G.C., Lime Kiln Design for Fuel Economy, American Ceram. Society Bulletin, 60(5) 561, USA, 1996.
22. Fishwick, J.H., Limestone Calcination in Various Atmospheres, Rock Products, 73 (7), 84, 1970.
23. Flachsenberg, P., German Lime Kilns Developments Meet Quality Demands, Rock Products, 73 (7), 75, 1970.
24. Furnass, C.C. The Rate of Calcination of Limestone, Ind. and Eng. Chem., 23, 537, 1931.
25. Gibbs, R., Calcining Rates of Limestone, Rock Products, 45 (5), 66, 1942.
26. Gibbs, R., Thermodynamics of Lime Manufacture, Roc Products, February, 1950.
27. Giftopoulos, E.P., Fundamentals of Analysis of Processes, Proc. ECOS'96. Stockholm, pp 1-4, 1996.
28. Guimaraes, J.C., Edwards, L.L., Lime Kilns Energy Saving: Modeling, Simulation and Control, Mechanical Engineering Dept. University of Idaho, American Institute of Chemical Engineers, 1981.
29. Gupta, A.K., Mohan, R., Thermal decomposition of limestone, Chemical Age of India, 199(3), 28, 1977.
30. Gupta, A.K., Mohan, R., Calcination period. An important parameter in the design of lime kilns, Chemical Engineering World, 63(6), XIII, 1996.
31. Hill, N., Holmes, S., Mather, D., Lime and Other Alternative Cements, 317 pp., Interm. Tech. Publ., London, 1992

32. Hill, N., Mason, K., Calculating the Energy Efficiency of a Lime Burning Process, *World Cement*, 28 (3) 52-56, 1997.
33. Hills, A.W.D., The Mechanism of Thermal Decomposition of Calcium Carbonate, *Chem. Eng. Sci.*, 23 (4), 297, 1968.
34. Holmes, S., Wingate, M., *Building with Lime*, 307 pp., Inter. Tech. Publications, London, 1997.
35. Hougen, O.A., Watson, K.H., Ragatz, R.A., *Principios de los Procesos Químicos*, 569 pp. Edición Revolucionaria, La Habana, 1987.
36. *Hydraulic Lime*, Inter. Tech. Publications., London, 1993.
37. Kupper, D., The courage to create and innovate- a sure path to high performance technology, *ZKG International*, (4) 164-196, 1998.
38. Li, J.B., et. al., Theoretical Decomposition of Limestone, *Chem. Abstract.*, 85 (2) Abst. # 24885, 1976.
39. *Lime Kiln Design*, Inter. Tech. Publications., London, 1991.
40. Martinez , E., *Estrategias, Planificación y Gestión de Ciencia y Tecnología*, 518 pp., Editorial Nueva Sociedad, Venezuela, 1993.
41. Maxwell-Cook, P.E., *Modern Kilns Technology*, World Cement Publications, England, 1990.
42. Middlemas, J.W., Lime Burning and Development of Oil Fired Lime Kilns, *Inst. Fuel Journal*, 36 (269), 244, 1963.
43. Narsimhan, G., Theoretical Decomposition of Calcium Carbonate, *Che. Eng. Sci.*, 16 (1-2), 7, 1961.

44. Ochoa George, P.A., Sobre la calcinación de la piedra caliza, Trabajo presentado en el II Fórum Nacional de Energía, 1985.
45. Ochoa George, P.A., Cales aéreas, hidráulicas, cemento romano y cales de preparación especial, Trabajo presentado en Conferencia Provincial de la UNAIIC, Cienfuegos, 1992.
46. Ochoa George, P.A., et.al., Manual de Operaciones para el Proceso de Producción de Cal, 104 pp., Imprenta MINAZ, La Habana, 1995.
47. Ochoa George, P.A., The Current Situation of the Lime Industry in Cuba, ZKG, 878 (5), 27, 1998.
48. Ochoa George, P.A., Tesis Doctoral, Universidad de Cienfuegos, 2000.
49. Parson, M.F., New Approach to Vertical Shaft Kiln, Pitt and Quarry, 57 (2), 124, 1964.
50. Patterson, M.G., What is energy efficiency, Energy Policy, 24(5)377-390, 1996.
51. Perdescu, L., Improving the Vertical Lime Kiln, Steel Times International, 22 (34-36), 10, 1988.
52. Perry, R.H., Chilton, C.H., Manual del Ingeniero Químico, 3tt, Mc Graw-Hill, Mexico, 1986.
53. Pollard, A.E., Lime Production in Belize, 20 pp., Interm. Tech. Publ., London, 1994.
54. Proyecto de Investigación de Hornos de Cal en Malawi, Intermediate Technology Development Group, Rugby, 1995.

55. Ruch, H., The theoretical limits of the heat consumption in lime burning considered on the basis of the physico-chemical relationships, ZKG, 20(1), 34, 1981.
56. Satterfield, C.N., Feakes, F., Thermal Decomposition of Calcium Carbonate, Ass. Int. Chem. Eng. Journal, 5 (1), 115, 1959.
57. Schaefer, R.R., Lime Calcining Optims, Rock Products, 84(10) 60, USA, 1991.
58. Schmalzried, D., Limestone calcination in vertical shaft kilns. ZKG International, (10) 578-584, 1998.
59. Schwarzkopf, F., Comparison of Modern Lime Calcining Systems, Rock Products, 73 (7), 68, 1970.
60. Smith, D.J., Efficiency, reliability and control of production enhanced during plant upgrade, Power Engineering International, (2) 19-24, 1996.
61. Spence, R., Lime in Industrial Developing, 125 pp., UNIDO, Sect. Studies Series # 18, August, 1985.
62. Spiropoulos, J., Producción de Cal a Pequeña Escala para Construcción, 93 pp., Edit. Friedrch Viewig & Sons, RFA, 1991.
63. Spiropoulos, J., Chenkumbi Lime, 39 pp. Intermediate Technology Publications, London, 1992.
64. Tanski, E.S., Kiln Efficiency, Pitt and Quarry, 54 (18), 97, 1962.
65. Thomas, H.P., Limits of the heat consumption of annular shaft kilns at combustion of lime, ZKG, 27(3), 34, 1981.

66. Traustel, S., Ulrich, W., The Mechanism of Limestone Calcination, Cement, Lime and Gravel, #11, 388, 1965.
67. Turkdogan, E.T., Olsson, R.G., Wriedt, H.A., Calcination of limestone, Transactions, 9, Vol 24, 1973.
68. UNCHS, Vertical-Shaft Lime Kilns Technology, 82 pp., United Nations Centre for Human Settlements (Habitat) Publications, Nairobi, 1993.
69. Verma, C.L., Analysis and design of Shaft Kilns for calcination of limestone, Chemical Age of India, 132(6), XVII, 1981.
70. Verma, C.L., Effect of Operational Parameters on Performance of Lime Shaft Kilns, Chemical Engineering World, 57(12), XI, 1994.
71. Verma, C.L., Dave, N.G., Comparative Studies on Cylindrical and Conical Lime Shaft Kilns, Journal of the Institution of Chemical Engineering of India, 211(3), 62, 1981.
72. Verma, C.L., Jain, S.K., Some recent developments in the designing of lime processing equipment, Research and Industry, 159(27), 1982.
73. Verma, C.L., Saxena, N.B., Trends in the Design and Development of Lime Shaft Kilns, Chem. Concepts 5 (9), 23, 1978.
74. Whitcomb, C.F., A Rapid Method for Analyzing the Performance of Calcining Kiln, Water and Sewage Works, November, 1961.
75. White, J.E., Lime Manufacture, 41 pp., Int. Tech. Publications, London, 1981.

76. Wingate, M., Sakula, J., Hill, N., Small-Scale Lime Burning. A Practical introduction, 185 pp., Intermediate Technology Publications, London, 1985.
77. Woods, R.M., Thermal Decomposition of Calcium carbonate, Lime Division of Kelwyn Research Association, USA, Feb., 1968.
78. Wuhrer, J., Theory of Burning Small Sized Limestone, ZKG, 16 (8), 219, 1963.
79. Zuideveld, P.L., van der Berg, P.J., Design of Lime Shaft Kilns, Chem. Eng. Sci., 26, 875-883, 1971.