



**UNIVERSIDAD DE CIENFUEGOS “CARLOS RAFAEL RODRIGUEZ”
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECNANICA**

TRABAJO DE DIPLOMA

En opción al Título de Ingeniero Mecánico

Título.

**Determinación del efecto económico de las pérdidas de
calor en ductos, ciclones y horno en la empresa
Cementos Cienfuegos S.A.**

Autor: Rolando Marrero Gómez.

Tutor: MSc., Ing.: José Luis Romero Cabrera.



Hago constar que el presente trabajo de diploma fue realizado en Cemento Cienfuegos S.A. como parte de la culminación de estudios de la especialidad de Ingeniería Mecánica, autorizando a que el mismo sea utilizado por la Institución, para los fines que estime conveniente, tanto de forma parcial como total y que además no podrá ser presentado en eventos, ni publicados sin autorización de la Empresa.

Firma del Autor

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido realizado según acuerdo de la dirección de nuestro centro y el mismo cumple con los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura referido a la temática señalada.

Firma del Tutor

Firma del Jefe de Departamento

Firma del Responsable de Información
Científico-Técnica



“Para construir hay que saber y para saber hay que estudiar, estudiar y estudiar”

V.I. Lenin

Dedicatoria

A mi hijo, mi madre, mi padre, mi hermano y familia en general por el cariño y el apoyo que
recibo cada día.

Agradecimiento.

Agradezco a todos y cada uno de los hicieron posible el éxito de mis estudios como ingeniero,
en especial a la Revolución y a mis Padres

Resumen

La determinación de efecto económico de las pérdidas de calor en ductos, ciclones y horno en la industria del cemento representa una metodología que permite evaluar las eficiencias de los refractarios instalados en los componentes del sistema de piroproceso. En Cementos Cienfuegos S.A., representó un método altamente eficaz para medir el estado actual de los refractarios, pues permitió conocer y valorar económicamente las pérdidas de calor por radiación y convección a través del sistema y emplearlo como herramienta para medir el desempeño térmico de los refractarios y facilitar la toma de decisiones sobre el cambio de manera óptima. Así, con este propósito, en el presente trabajo se determinaron las temperaturas de referencia para el cambio de refractario en el horno y el calcinador, Los cálculos mostraron que en el horno rotatorio, las pérdidas totales de calor están en el orden de las 4215744kcal/h, que representa el 42% del total del proceso y el 96.6% del total de las pérdidas de los ciclones y el calcinador, por lo que deben realizarse en la menor brevedad la sustitución del refractarios en aquellas zonas donde la temperatura supere los 295 °C para un mejor aprovechamiento los recursos energéticos, reflejado en un menor consumo calórico y en una producción más eficiente.

Palabras clave: Piroproceso, horno rotatorio, calcinador, ciclones, refractarios. clinker.

Summary.

The determination of the economic effect of heat losses in ducts, cyclones, and kilns in the cement industry represents a methodology that allows evaluating the efficiencies of the refractories installed in the components of the pyroprocessing system. In Cementos Cienfuegos S.A., it represented a highly effective method to measure the current state of the refractories, since it allowed to know and economically assess the heat losses by radiation and convection through the system and to use it as a tool to measure the thermal performance of the refractories and facilitate decision-making about change in an optimal way. Thus, with this purpose, in the present work the reference temperatures for the change of refractory in the kiln and the calciner were determined. The calculations showed that in the rotary kiln, the total heat losses are in the order of 4215744kcal/ h, which represents 42% of the total process and 96.6% of the total losses from the cyclones and the calciner, so the replacement of refractories must be carried out as soon as possible in those areas where the temperature exceeds 295 oC for a better use of energy resources, reflected in lower caloric consumption and more efficient production.

Keywords: Pyroprocess, rotary kiln, calciner, cyclones, refractories. clinker.

Índice:

INTRODUCCIÓN.....	11
CAPITULO I. Revisión bibliográfica (actualidad).....	16
1.1 Transferencia de calor.....	16
1.1.1 Mecanismos básicos de la transmisión del calor. (Rohsenow, W. et. Al. 1973).....	16
1.1.2 Pérdidas de calor en líneas de superficie.....	21
1.2 Intercambiadores de calor.)Holman J. P. 1998).....	23
1.2.1 Clasificación de los intercambiadores de calor.	24
1.2.1.3. Clasificación según el número de fluidos involucrados.	25
1.2.1.4. Clasificación según la disposición de los fluidos.	25
1.3. Aplicaciones de los intercambiadores de calor.....	26
1.3.1. Intercambiadores de calor en la industria de cemento. (LAFARGE 2010).....	27
1.3.2 Construcción del intercambiador de calor ciclónico.	28
1.4 Aislamientos térmicos. (RINCON J. 2009).....	29
Capitulo II. Descripción del objeto de estudio y metodología a emplear.....	38
2.1 Descripción del objeto de estudio.....	38
2.2 Descripción del Proceso productivo.....	41
2.3 Corrientes calóricas de entrada y salida del sistema.	42
2.4 Proceso de Clinkerización.....	45
2.5. Funcionamiento de la torre precalentadora.....	45
2.5.1 Ciclones en Precalentadores de Suspensión.	48
2.5.2 Calcinador.....	50
2.5.3 Cámara de entrada.....	51
2.5.4 Horno de proceso seco.....	52
3.5.5 Enfriador.....	55
3.6 Justificación de la investigación.	57
2.7 Metodología.....	58
CAPITULO III. Aplicación de la metodología y análisis de resultados.....	63
3.1 Horno rotatorio.....	63
3.2 Ducto terciario.....	68
3.3 Cabezal del horno.....	69

3.4 Cámara de humos.	70
3.5 Calcinador.....	71
3.6 Ciclones.	73
3.7 Análisis de resultados.....	78
CONCLUSIONES.	83
RECOMENDACIONES.....	85
Bibliografía	87

INTRODUCCION.

INTRODUCCIÓN.

El cemento es un producto básico y necesario para el desarrollo de los países, pues representa un elemento fundamental en la infraestructura de un país. Asimismo, es un sistema de alto consumo calórico, debido a las altas temperaturas que se requiere dentro del horno para la sinterización del clinker y a la descomposición de las materias primas.

Ello representa un gran impacto ambiental dado a las emisiones de gases de efecto invernadero que el proceso produce. A nivel mundial, las cementeras generan mayor cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero dado el alto consumo energético requerido por unidad de producción. Se estima que comprenden el 5% de las emisiones de origen antropogénico. (Hendricks C, 2004)

Asimismo, el consumo de energía en la industria del cemento representa cerca del 2% del consumo de la energía global primaria y, aproximadamente, el 5% de la energía consumida por las industrias a nivel mundial. Para la producción del cemento, el consumo primario depende básicamente del tipo de tecnología de producción, donde aquellos hornos que poseen sistemas de calentador y precalcinador usan, aproximadamente 3,06 GJ de energía por tonelada de clinker producido, mientras que un horno húmedo requiere entre 5,3 a 7,1 GJ de energía por tonelada de clinker producido (WB 2007).

Asimismo, más del 90% de toda la energía utilizada para la producción de cemento corresponde al uso de los combustibles fósiles, principalmente carbón mineral, coque, petróleo y gas natural. De los cuales el carbón es el combustible más utilizado por este tipo de industrias, dado su mayor poder calorífico y precios relativamente bajos en comparación al petróleo y derivados de este. Según el Instituto Mundial del Carbón, globalmente se consumen 500g de carbón por cada 1000 g de cemento producido (WB 2007). En virtud de lo anterior mencionado, existe una necesidad imperiosa de utilizar de manera más eficiente la energía térmica del combustible a través de un gerenciamiento y racionalización de la energía, que permita conseguir la máxima eficiencia en la industria. El ahorro de la energía y su gestión son las mejores alternativas en la industria del cemento para lograr competitividad y excelencia operativa.

En este sentido, el análisis de pérdidas de calor representa una herramienta muy efectiva para el desarrollo de un adecuado control térmico y económico del proceso. Por esta razón, el presente trabajo se fundamenta en la evaluación de estas pérdidas calóricas por medio de la realización de mediciones del campo de temperatura en las superficies de los equipos de la instalación de piroproceso, con el fin de proveer los resultados para un control y manejo adecuado de la operación de los diferentes componentes del sistema. Con ello se busca revelar en forma detallada las posibles oportunidades de mejora y obtención de una mayor eficiencia y racionalización adecuada del consumo de combustible.

En la actualidad las industrias cementeras presentan una gran presión por la alta competencia en precio del cemento y el clinker, por lo que se ven obligadas a reducir costos de producción de diversas formas. Una de ellas es el ahorro en el consumo energético. La selección de los refractario es una de los aspectos de mayor incidencia en las pérdidas de calor y por tanto el consumo de combustible. Las altas temperaturas en las superficies de los ciclones, ductos y horno por encima de 700K aceleran además los procesos de corrosión y agrietamiento en los metales.

En este sentido el conocimiento de los valores de temperatura en la superficie de los ciclones, ductos y horno, permite estimar las pérdidas de calor y su valoración económica para optimizar los recursos financieros con la sustitución de los refractarios en el momento donde las pérdidas económicas asociadas al exceso consumo de combustible superen los costos de adquisición del refractario y no se pueda garantizar la producción ni la seguridad del personal y la instalación.

El presente estudio se desarrolló en la empresa de Cemento Cienfuegos S.A. donde el consumo calórico de la producción de clinker representa más del 50% del costos variable de la producción de cemento [CCCSA 2019) y el 44% de las emisiones de CO₂. En los últimos años se ha venido incrementando las pérdidas de calor por procesos de convección y radiación asociado al deterioro de los refractarios de las instalaciones de piroproceso (precalentadores, horno y enfriador de clinker) asociado a la situación financiera en el ámbito internacional y nacional, que han impedido la compra de estos insumos para la sustitución durante los mantenimientos a estos sistemas.

En este contexto se plantea como PROBLEMA CIENTÍFICO, ¿Cómo estimar a partir de las mediciones del campo de temperatura en ductos, ciclones, horno y enfriador, el efecto económico asociadas al exceso consumo de combustible debido a las pérdidas de calor en la empresa Cementos Cienfuegos S.A.?

Como HIPÓTESIS se plantea que a partir de las mediciones del campo de temperatura en ductos, ciclones, horno y enfriador, se puede determinar el efecto económico de las pérdidas de calor en la empresa Cementos Cienfuegos S.A.?

OBJETIVO.

Objetivo General.

Estimar el efecto económico del exceso consumo de combustible asociadas a las pérdidas de calor a partir de las mediciones del campo de temperatura en ductos, ciclones, horno y enfriador, en la empresa Cementos Cienfuegos S.A.

Objetivos Específicos-

1. Analizar los procesos de transferencia de calor presentes en las superficies de los ductos, ciclones y hornos.
2. Determinar los parámetros geométricos de ductos, ciclones, horno y enfriador, necesarios para los realizar los cálculos de las pérdidas de calor, así como las características de sus refractarios.
3. Establecer el programa de medición del campo de temperatura en las superficies de ductos, ciclones, horno y enfriador para estimar pérdidas de calor.
4. Determinar el exceso de combustible asociado a las pérdidas de calor y su efecto económico.
5. Proponer el umbral de pérdidas de calor para el cambio de refractario para ductos, ciclones y horno.

Para la evaluación del sistema se delimitó un volumen de control (comprendido por los ductos, precalentador, horno rotario y en enfriador de clinker). Para ello, se recolectó la

información necesaria (proveniente de mediciones, análisis de laboratorio, información histórica, etc.) registrados en la Planta. Esta información fue depositada en la hoja de cálculo diseñada y finalmente, por medio de los resultados obtenidos se llevó a cabo un análisis técnico-económico que involucran las variables más relevantes del sistema referentes al consumo calórico y las pérdidas de energía.

En general el trabajo está estructurado en introducción, tres capítulos, conclusiones, recomendaciones, bibliografía y anexos.

Capítulo I: Revisión bibliográfica (actualidad).

Se realizará una revisión documental sobre diferentes modos de transferencia de calor y conceptos básicos en cada uno de ellos, así como las pérdidas de calor en los sistemas tecnológicos de la industria del cemento.

Capítulo II: Caracterización de la empresa y metodología a emplear.

Se realiza la caracterización de la entidad y una descripción de los principales elementos de la instalación de piropceso donde se producen las mayores pérdidas de calor, y se establece el procedimiento para la realización del estudio.

Capítulo III: Análisis de resultados.

Se determinan las pérdidas de calor de ductos, ciclones y horno, se realiza la valoración económica de las mismas y se proponen valores de pérdidas umbrales para el cambio de refractario.

CAPITULO 1.

CAPITULO I. Revisión bibliográfica (actualidad)

1.1 Transferencia de calor.

La energía calorífica se transmite desde las zonas de alta temperatura a las de baja temperatura, en un proceso que va acompañado de un cambio de entropía hasta que se alcanza, si es posible, el estado de equilibrio térmico caracterizado por una distribución uniforme de temperaturas. En este sentido se define el calor como la transferencia de energía que tiene lugar sin un movimiento ordenado del sistema, en contraposición a la transferencia de energía que tiene lugar con un movimiento ordenado durante la realización de un trabajo mecánico.

La Termodinámica de los procesos reversibles estudia la transferencia de energía en éstos, pero siempre a lo largo de una sucesión de estados de equilibrio. Sin embargo, en un proceso de intercambio de calor entre cuerpos a distintas temperaturas, en tanto se mantenga una diferencia finita de temperaturas entre los mismos habrá un flujo irreversible de calor entre dichos cuerpos y no existirá estados de equilibrio.

1.1.1 Mecanismos básicos de la transmisión del calor. (Rohsenow, W. et. Al. 1973).

La transferencia de calor es la energía en tránsito debido a una diferencia de temperatura, “el calor es la forma de la energía que se puede transferir de un sistema a otro como resultado de la diferencia en la temperatura. La transferencia de energía por flujo de calor no puede ser medida directamente, pero el concepto tiene un significado físico porque está relacionado con la cantidad medida llamada temperatura. En los estudios de transferencia de calor, es común considerar tres modos diferentes de transferencia de calor: conducción, convección y radiación (Cengel, 2020)

Conducción: La energía calorífica se transmite durante el contacto directo entre cuerpos (o partes de los mismos) a distintas temperaturas y tiene lugar mediante choques o acoplamientos entre las moléculas del sistema (unas en zonas más calientes, con mayor energía térmica y otras en las zonas más frías, con menor energía térmica), aunque no haya un movimiento macroscópico de las moléculas, o el material sea transparente a la radiación. Este proceso es de gran importancia en sólidos, pero de menor importancia en líquidos y

gases, donde normalmente aparece combinado con la convección y es prácticamente enmascarado por ésta.

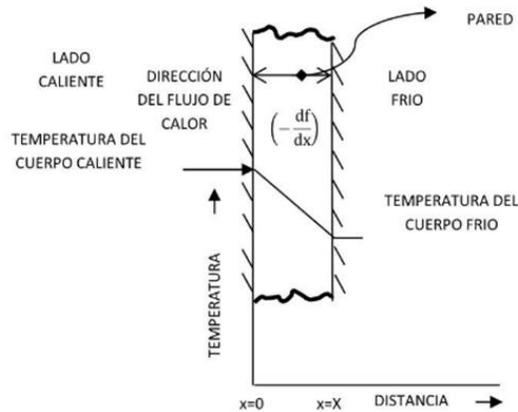


Fig.1.1 Flujo de calor a través de una pared.

Fuente: Holman, J. P., Transferencia de calor. Mc Graw-Hill, 1998.

La dirección del flujo de calor será a ángulos rectos a la pared, si las superficies de las paredes son isotérmicas y el cuerpo es homogéneo e isotrópico. Supóngase que una fuente de calor existe a la izquierda de la pared y que existe un receptor de calor en la superficie derecha. Si t es la temperatura en cualquier punto de la pared y x es el grueso de la pared en dirección del flujo de calor, la cantidad de flujo de calor dQ es dada por: (Brulhart 2011)

$$dQ = kA \left(-\frac{dt}{dx}\right) \quad W/h \quad (1)$$

El término $-dt/dx$ se llama gradiente de temperatura y tiene un signo negativo si se supone una temperatura mayor en la cara de la pared en donde $x = 0$ y menor en la cara donde $x = X$. En otras palabras, la cantidad instantánea de transferencia de calor es proporcional al área y a la diferencia de temperatura dt que impulsa el calor a través de la pared de espesor dx . La constante de proporcionalidad k es peculiar a la conducción de calor por conductividad y se le conoce por conductividad térmica.

Convección: en sentido más general, se denomina convección a todo proceso de transferencia de calor entre dos zonas a distinta temperatura como consecuencia del movimiento de materia caliente hacia las zonas frías y de materia fría hacia las zonas

calientes. Obviamente la convección aparecerá únicamente en fluidos, que es donde puede producirse este movimiento de materia

La convección puede ser natural o forzada. Se dice que la convección es natural cuando las paredes en contacto con el sistema están en reposo, (por ejemplo, en un convector de los denominados radiadores), mientras que se dice que la convección es forzada cuando algunas de las paredes en contacto con el fluido se mueven favoreciendo la circulación de éste. En convección natural el fluido se mueve espontáneamente en el campo de fuerza gravitatorio como consecuencia de la diferencia de densidades entre zonas calientes y frías. en ambos casos la transferencia de calor viene dada por la Ley de Enfriamiento de Newton. (Cengel, et, al. 2007)

$$q/A = h_c (T_f - T_s) \quad (2)$$

Donde q es la transferencia de calor en W/h , A es el área a través de la cual ocurre el flujo de calor en m^2 , h_c es el coeficiente de transferencia de calor por convección en $W/m^2 \cdot ^\circ K$ y T_f T_s las temperaturas absolutas del fluido y de la superficie en $^\circ K$, respectivamente.

El coeficiente de transferencia de calor por convección se determina del número de Nusselt, un número adimensional que mide el aumento de la transmisión de calor desde una superficie por la que un fluido discurre (transferencia de calor por convección) comparada con la transferencia de calor si ésta ocurriera solamente por conducción.

$$Nu = h \cdot L/k \quad (3)$$

Dónde:

k_f : es la conductividad térmica del fluido [$W/m \cdot K$]

L : es la longitud característica

h : es el coeficiente de transferencia de calor por convección [$W/m^2 \cdot K$]

En buena parte de los casos el número de Nusselt para la convección forzada puede ajustarse por una expresión de la forma: (Ojotin, et, al. 1988)

$$Nu = k \cdot Re^m \cdot Pr^n \quad (4)$$

Dependiendo del tipo de flujo (laminar o turbulento) y de la geometría de las superficies se utilizan distintas expresiones para el número de Nusselt. Así, para superficies planas en régimen laminar se utiliza una expresión de la forma:

$$Nu = 0,664 Re^{1/2} \cdot Pr^{1/3} \quad (5)$$

válida en el rango: $Pr < 0,6$ y $Re < 5E05$.

Para una superficie plana en régimen turbulento se utiliza la expresión

$$Nu = 0,037 \cdot Re^{4/5} \cdot Pr^{1/3} \quad (6)$$

válida en el rango $0,6 < Pr < 60$ y $5E05 < Re < E07$. A menudo la lámina es lo suficientemente grande para que se tenga una combinación de flujo laminar y turbulento.

En este caso,

$$Nu = (0,037 \cdot Re^{4/5} - 871) \cdot Pr^{1/3} \quad (7)$$

válida en el rango $0,6 < Pr < 60$ y $5 E05 < Re < E07$.

Radiación: La energía calorífica se transmite en forma de energía de la radiación electromagnética, emitida por todos los cuerpos por el hecho de encontrarse a una temperatura T , y que se propaga a la velocidad de la luz (porque es luz de distintas longitudes de onda) y puede ser absorbida por los cuerpos, aumentando su temperatura. Así, el proceso de intercambio de energía por radiación es un proceso de absorción y emisión posterior de energía en forma de fotones por parte de los átomos y moléculas de una sustancia. (Nergiza 2013)

Cuando un cuerpo se calienta, emite radiación electromagnética de una longitud de onda λ que se encuentra típicamente comprendida en el rango de longitudes de onda de $0,1$ a $100\mu\text{m}$, a la que se denomina radiación térmica. Lo que denominamos radiación visible es una porción muy estrecha del espectro y de la radiación térmica, que se extiende aproximadamente desde $0,35\mu\text{m}$ hasta $0,75\mu\text{m}$, como se muestra en la figura 1. Antes de calentarse el cuerpo también emitía radiación electromagnética, pero de longitudes de onda mayores (menor energía) y estaba en equilibrio térmico con el medio, esto es, emitía lo mismo que absorbía. A la distribución de energía emitida en función de la longitud de onda

o frecuencia de la radiación se le denomina espectro de la radiación. La mayor parte de los sólidos y los líquidos tienen un espectro continuo de radiación, es decir, emiten energía en todas las longitudes de onda desde cero a ∞ , aunque la intensidad con que lo hacen depende fuertemente de la región del espectro en la que se observa la radiación emitida.

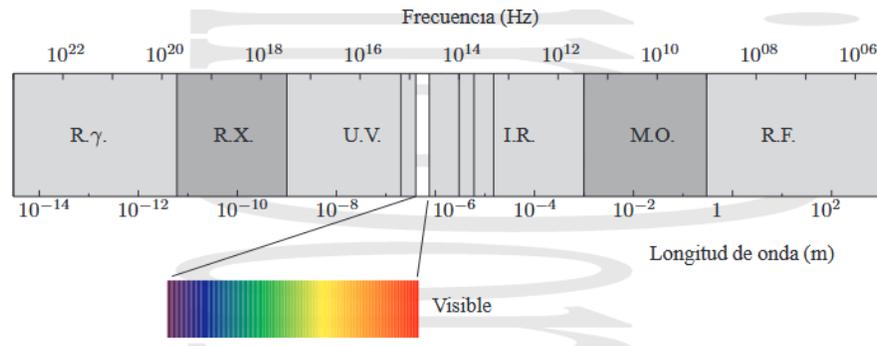


Fig. 1.2 Espectro de la radiación monocromática.

Fuente: Holman, J. P., Transferencia de calor. Mc Graw-Hill, 1998.

La energía radiante de un emisor aumenta con la temperatura, ya que su energía interna aumenta. Cuando la temperatura cambia, no sólo cambia la magnitud absoluta de la energía, sino también su distribución en longitudes de onda (el espectro de la radiación). Al aumentar la temperatura aumenta la proporción de radiación de longitud de onda corta (alta frecuencia-alta energía) mientras que al disminuir la temperatura aumenta la proporción de radiación de longitud de onda larga (baja frecuencia-baja energía). La transmisión del calor por radiación térmica depende de la temperatura de una forma mucho más acusada que en el caso de la conducción o la convección, pudiendo a altas temperaturas convertirse en el mecanismo principal de transmisión de energía. (Nergiza 2013)

Considerar la transferencia de radiación por una superficie de área A , que se encuentra a una temperatura T . La radiación que emite la superficie, se produce a partir de la energía térmica de la materia limitada por la superficie. La rapidez a la cual se libera energía se llama potencia de radiación H , su valor es proporcional a la cuarta potencia de la temperatura absoluta. Esto se conoce como la ley de Stefan (Joseph Stefan, austriaco, 1835-1893), que se escribe como:

$$H = \epsilon\sigma AT^4 \quad (8)$$

Donde $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K}^4)$ se llama constante de Stefan-Boltzmann y ϵ es una propiedad radiativa de la superficie llamada emisividad, sus valores varían en el rango $0 < \epsilon < 1$, es una medida de la eficiencia con que la superficie emite energía radiante, depende del material.

Si un cuerpo se encuentra a temperatura T y o el ambiente a una temperatura T_o , la energía neta ganada o perdida por segundo como resultado de la radiación puede ser calculada por la siguiente expresión: (Isachenko, V.P, et. al 1979)

$$H_{neta} = \epsilon \sigma A (T^4 - T_o^4) \tag{9}$$

1.1.2 Pérdidas de calor en líneas de superficie.

En este tipo de pérdidas están incluidos los tres mecanismos de transferencia de calor: conducción, convección y radiación. Su magnitud depende de la longitud de tubería y su diámetro, de la naturaleza y espesor del aislante, y de la temperatura del fluido caliente en la línea y del medio ambiente que la rodea. (Rohsenow, W. et. Al. 1973). Las pérdidas de calor en líneas de superficie pueden estimarse en base a datos reportados en la literatura (Bejan, A. 1993), tales como los presentados en la tabla 2 y calcularse de acuerdo a la ecuación 10.

Tabla 1. Pérdidas de calor en líneas de superficie.

		Pérdida de calor, Btu/hr/pie ²		
		Temperatura de la superficie interna		
Aislante	Condición	200 °F	400 °F	600 °F
Sin aislante	Aire estático, 0 °F	540	1500	3120
	Aire estático, 100 °F	210	990	2250
	Aire a 10 mph, 0 °F	1010	2540	4680
	Aire a 10 mph, 100 °F	440	1710	3500
	Aire a 40 mph, 0 °F	1620	4120	7440
	Aire a 40 mph, 100 °F	700	2760	5650

$$q = UA_{\text{exterior}} (T_s - T_{\text{amb}}) \tag{10}$$

Dónde:

q: Tasa de pérdidas de Calor, W/h

U: Coeficiente de transferencia de calor total para el sistema, referido al área exterior del mismo, W/hm²°K

Á_{exterior}: Área exterior total del sistema expuesta al flujo de calor en m².

T_s: Temperatura del Fluido fluyendo en la línea, °K

T_{amb}: Temperatura del medio ambiente donde se encuentra la línea, °K

La expresión para U en caso de líneas con aislante, y referida al área exterior, es la siguiente:

$$U = \left[\frac{r_{\text{aisl}}}{r_i h_{\text{ci}}} + \frac{r_{\text{aisl}} \ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right)}{K_{\text{acero}}} + \frac{r_{\text{aisl}} \ln\left(\frac{r_{\text{aisl}}}{r_e}\right)}{K_{\text{aisl}}} + \frac{1}{h_{\text{ce}} + h_r} \right]^{-1} \quad (11)$$

Dónde:

r_i: radio interno de la tubería, m

r_e: radio externo de la tubería, m

r_{aisl}: radio del aislante, es decir, (r_e+ l_{aisl}) siendo (l_{aisl}) el espesor del aislante, en m

K_{acero}: conductividad térmica del acero del cual está construida la línea, W/hm°K.

K_{aisl}: conductividad térmica del material aislante, W/hm°K. Depende de la naturaleza del material aislante.

h: coeficiente de radiación de la superficie exterior de la tubería o del aislante en caso que este exista, W/hm°K. Depende de la temperatura en la superficie exterior del aislante o de la tubería, T_e, y de la temperatura ambiente, T_{amb}.

h_{ci}: coeficiente de convección de la superficie interna de la tubería, W/hm² °K.

h_{ce}: coeficiente de convección entre el fluido existente en el medio ambiente exterior a la tubería, aire generalmente, y la superficie exterior de la tubería o aislante, en caso que este último exista, W/hm²°K. Depende la presión y temperatura en el medio ambiente y de si existe o no viento en el medio ambiente exterior, es decir, de si existe convección forzada o libre.

Para convección libre:

$$h_{\text{ce}} = 0.53 \frac{K_a}{D_{\text{ext}}} \left[D_{\text{ext}}^3 (T_e - T_{\text{amb}}) \right]^{\frac{1}{4}} \left(\frac{g \beta_a}{\nu_a^2} * \frac{C_{\text{pa}} \mu_a}{K_a} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (12)$$

Dónde:

D_{iext} : diámetro exterior de la tubería o del aislante en caso que exista, m
 K_a : conductividad térmica del aire, W/hm^{°K}
 β_a : coeficiente de expansión volumétrica del aire, m/m °K
 ν_a : viscosidad cinemática del aire, m²/s
 μ_a : viscosidad dinámica, kg/m-h
 g : constante de la gravedad; m/s²
 C_{pa} : capacidad calorífica del aire a presión constante, W/m³°K

Para convección forzada

$$h_{ce} = 19.3C_{pa} \frac{(\rho_a V_w)^{0.6}}{D_{iext}^{0.4}} \quad \text{si } 1000 < 8800D_{iext}V_w < 50000 \quad (13)$$

$$h_{ce} = 0.0239 \frac{K_a}{D_{iext}} \left[\frac{5280\rho_a V_w D_{iext}}{\mu_a} \right]^{0.806} \quad \text{si } 8800D_{iext}V_w > 50000$$

Donde, V_w es la velocidad del viento en m/h y ρ_a la densidad del aire en g/cm³. Las propiedades físicas del aire requeridas en las ecuaciones anteriores, se pueden estimar en función de temperatura y a presión atmosférica, mediante las ecuaciones:

$$K_a = 0.01328 + 2.471 \cdot 10^{-5}T - 4.247 \cdot 10^{-9}T^2 \quad (13)$$

$$\rho_a = 0.0771 - 8.848 \cdot 10^{-5}T - 3.744 \cdot 10^{-8}T^2 \quad (14)$$

$$\mu_a = 0.0400 + 6.155 \cdot 10^{-5}T - 1.220 \cdot 10^{-8}T^2 \quad (15)$$

$$C_{pa} = 0.2382 + 1.390 \cdot 10^{-5}T - 1.027 \cdot 10^{-8}T^2 \quad (16)$$

$$\beta_a = 0.0024 + 9.757 \cdot 10^{-5}T - 0.169 \cdot 10^{-7}T^2 - 0.148 \cdot 10^{-10}T^3 \quad (17)$$

1.2 Intercambiadores de calor.)Holman J. P. 1998)

En los sistemas mecánicos, químicos, nucleares y otros, ocurre que el calor debe ser transferido de un lugar a otro, o bien de un fluido a otro. Los intercambiadores de calor son dispositivos que permiten realizar dicha tarea. Un entendimiento básico de los componentes mecánicos de los intercambiadores de calor es necesario para comprender como estos funcionan y operan para un adecuado diseño.

La función de los intercambiadores de calor es la transferencia de calor, donde los fluidos involucrados deben estar a temperaturas diferentes. Se debe tener en mente que el calor solo se transfiere en una sola dirección, del fluido con mayor temperatura hacia el fluido de

menor temperatura al encontrarse ambos fluidos en contacto térmico con las paredes metálicas que los separan.

Algunas de las aplicaciones más comunes se encuentran en calentamiento, ventilación, sistema de acondicionamiento de espacios, radiadores en máquinas de combustión interna, calderas, condensadores, y pre-calentadores o enfriamiento de fluidos.

1.2.1 Clasificación de los intercambiadores de calor.

Los intercambiadores de calor se pueden clasificar de acuerdo a diferentes criterios: tipo de contacto entre fluidos, relación área de transferencia de calor a volumen ocupado, número de fluidos involucrados, de acuerdo al servicio, tipo de construcción, etc. Los cuales se describen a continuación.

1.2.1.1 Clasificación según el proceso de transferencia.

De contacto directo: en este tipo de intercambiadores, el calor es transferido por contacto directo entre dos fluidos en distintas fases (generalmente un gas y un líquido de muy baja presión de vapor) fácilmente separables después del proceso de transferencia de energía, como sucede en las torres de enfriamiento de agua con flujo de aire y a su vez este puede ser forzado o natural.

De contacto indirecto: En los intercambiadores de tipo contacto indirecto, las corrientes permanecen separadas y la transferencia de calor se realiza a través de una pared divisora, o desde el interior hacia el exterior de la pared de una forma no continua. Cuando el flujo de calor es intermitente, es decir, cuando el calor se almacena primero en la superficie del equipo y luego se transmite al fluido frío, se denominan intercambiadores tipo transferencia indirecta, o tipo almacenador o sencillamente regenerador. La resistencia en el flujo de calor es posible debido a que el paso de las corrientes tanto caliente como fría es alternado; como ejemplo se puede mencionar los precalentadores de aire para hornos.

Aquellos equipos en los que existe un flujo continuo de calor desde la corriente fría, a través de una delgada pared divisora son llamados intercambiadores tipo transferencia directa o simplemente recuperadores; estos son los más usados a nivel industrial.

1.2.1.2. Clasificación según los mecanismos de transferencia de calor.

Los mecanismos básicos de transferencia de calor entre un fluido y una superficie son:

- ✓ Convección en una sola fase, forzada o libre.
- ✓ Convección con cambio de fase, forzada o libre: condensación o ebullición.
- ✓ Una combinación de convección y radiación.

Cualquiera de estos mecanismos o una combinación de ellos pueden estar activos a cada lado de la pared del equipo. Por ejemplo, convección en una sola fase se encuentra en radiadores de automóviles, enfriadores, refrigeradores, etcétera. Convección monofásica de un lado y bifásica del otro se puede encontrar en evaporadores, generadores de vapor, condensadores, etcétera. Por su parte la convección acompañada de radiación térmica juega un papel importante en intercambiadores de metales líquidos, hornos, etc.

1.2.1.3. Clasificación según el número de fluidos involucrados.

La mayoría de los procesos de disipación o recuperación de energía térmica envuelve la transferencia de calor entre dos fluidos, de aquí que los intercambiadores de dos fluidos sean los más comunes, sin embargo, se encuentran equipos que operan con tres fluidos. Por ejemplo, en procesos criogénicos y en algunos procesos químicos: separación de aire-helio, síntesis de amonio, etc.

1.2.1.4. Clasificación según la disposición de los fluidos.

La selección de una disposición de flujo en particular depende de la eficiencia de intercambio requerida, los esfuerzos térmicos permitidos, los niveles de temperatura de los fluidos, entre otros factores. Algunas de las disposiciones más comunes de flujo son:

1.2.1.4.1. Intercambiador de calor de paso único.

Se distinguen tres tipos básicos:

a) Flujo en paralelo o co-corriente: existe un flujo paralelo cuando el flujo interno o de los tubos y el flujo externo o de la coraza fluyen en la misma dirección. En este caso, los dos fluidos entran al intercambiador por el mismo extremo y estos presentan una diferencia de temperatura significativa. Como el calor se transfiere del fluido con mayor temperatura

hacia el fluido de menor temperatura, la temperatura de los fluidos se aproxima una a la otra, es decir que uno disminuye su temperatura y el otro la aumenta tratando de alcanzar el equilibrio térmico entre ellos. Queda claro que el fluido con menor temperatura nunca alcanza la temperatura del fluido más caliente.

b) En contracorriente o contraflujo: se presenta un contraflujo cuando los dos fluidos fluyen en la misma dirección pero en sentido opuesto. Cada uno de los fluidos entra al intercambiador por diferentes extremos, ya que el fluido con menor temperatura sale en contraflujo del intercambiador de calor en el extremo donde entra el fluido con mayor temperatura, la temperatura del fluido más frío se aproximará a la temperatura del fluido de entrada. En contraste con el intercambiador de calor de flujo paralelo, el intercambiador de contraflujo puede presentar la temperatura más alta en el fluido frío y la más baja temperatura en el fluido caliente una vez realizada la transferencia de calor en el intercambiador.

c) Intercambiador de flujo cruzado: como en el intercambiador de calor de flujo cruzado uno de los fluidos fluye de manera perpendicular al otro fluido, esto es, uno de los fluidos pasa a través de tubos mientras que el otro pasa alrededor de dichos tubos formando un ángulo de 90° . Los intercambiadores de flujo cruzado son comúnmente usados donde uno de los fluidos presenta cambio de fase y por tanto se tiene un fluido pasado por el intercambiador en dos fases bifásico.

1.3. Aplicaciones de los intercambiadores de calor.

Los intercambiadores de calor son equipos cuya función principal es realizar una transferencia de calor desde un fluido a otro a través de paredes metálicas y sin que ocurra contacto directo entre ellos, estos equipos tienen una extensa aplicación y se pueden encontrar en la industria, en el transporte, en laboratorios e inclusive en el hogar.

Los intercambiadores se pueden encontrar en cualquier industria que requiera su aplicación, es decir, pueden ser empleados en la industria petrolera, en plantas petroquímicas procesadoras de gas, procesos de refinación, procesos criogénicos, en la industria farmacéutica, química, entre muchas más aplicaciones.

1.3.1. Intercambiadores de calor en la industria de cemento. (LAFARGE 2010)

Los sistemas para el intercambio de calor son una parte de la instalación de horno para cemento-clínker, previo al calcinador y al horno rotatorio. Mediante el principio de contracorriente se precaliente la harina cruda mediante el flujo de gas ascendente por etapas, calcinándolo hasta un grado de descarbonatación de aprox. 95%. En función de la humedad de la materia prima y la capacidad de la instalación se usan intercambiadores de calor de uno o dos tramos con tres, cuatro o cinco etapas de ciclón.

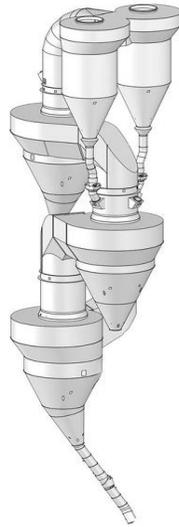


Fig. 1.3 Vista del precalentador de 3 etapas de ciclones.

Fuente: DUDA, W . H. Cement Data Book, Bauverlag GmbH, Wiesbaden y Berlín.

El intercambiador de calor por suspensión en gases, de cuatro etapas, está destinado a someter el crudo de cemento a un tratamiento primario antes de su entrada al horno rotatorio. El intercambiador de calor, hoy día calificado de convencional, utilizando todo el caudal de gases de escape que se producen en el horno con ocasión de la cocción del clínker, forma, en conjunto con el horno, una sola unidad tecnológica. Aprovechando la energía calorífica de los gases de escape procedentes del horno, cuya temperatura asciende, en la cámara de entrada, a 1.050° hasta 1.250°C , se somete el crudo, hasta su entrada al horno, a un calentamiento hasta 780° a 830°C . El separador de doble ciclón de la etapa I y los tres ciclones dispuestos a continuación, en el sentido de flujo del crudo, forman las cuatro etapas del intercambiador de calor de conducto único. En un sistema de construcción

gemela se conectan dos conductos de intercambiador de calor a una única cámara de entrada. El tratamiento primario del crudo en las etapas considera que los períodos de calentamiento para las partículas de crudo en el flujo de gases, de 0,1 hasta 0,3 segundos, pueden ser sobrepasados para fracciones de granulometría gruesa de crudos preparados industrialmente y por originarse aglomeraciones de crudo.

Por repetirse cuatro veces la dispersión en el flujo de gases de escape se garantiza, así pues, que se aprovechan al máximo las posibilidades físicas para conseguir la máxima transmisión posible de calor al crudo. La temperatura de los gases de escape desciende con esta ocasión hasta valores de 300° hasta 360°C delante del ventilador del sistema del intercambiador de calor. Su energía térmica es, sin embargo, todavía suficiente para secar el caudal de materias primas, correspondiente al rendimiento del horno, con una humedad inicial de 8 hasta 9 %, en sistemas de molturación apropiados al respecto, consiguiendo humedades residuales inferiores a 1 %.

El empleo de largos tubos de inmersión en el sector inferior del intercambiador de calor, tubos que en caso de avería dan lugar a taponamientos, no corresponde, además, al criterio respecto a seguridad de servicio e insensibilidad en caso de errores de operación, respectivamente, excesivas temperaturas temporales.

1.3.2 Construcción del intercambiador de calor ciclónico.

El dimensionamiento de los ciclones se basa en la relación $Q^2/S^2 = \text{constante}$, siendo Q el caudal de gases de escape y S el diámetro interior del ciclón o del conducto de gases. Como constante se considera la pérdida de presión en el sistema, $p = 500$ mm columna de agua, por ejemplo para una altura de instalación hasta 500 m s.n.m.

Decisivo para la función determinante del ciclón, como elemento separador destinado a separar el crudo del gas portador de energía térmica, sigue siendo la disposición de la espira de entrada a continuación de la tubería de gases ascendiente con el codo, que desemboca, tal como se representa en la figura 1.4, a través de la mitad de la circunferencia.

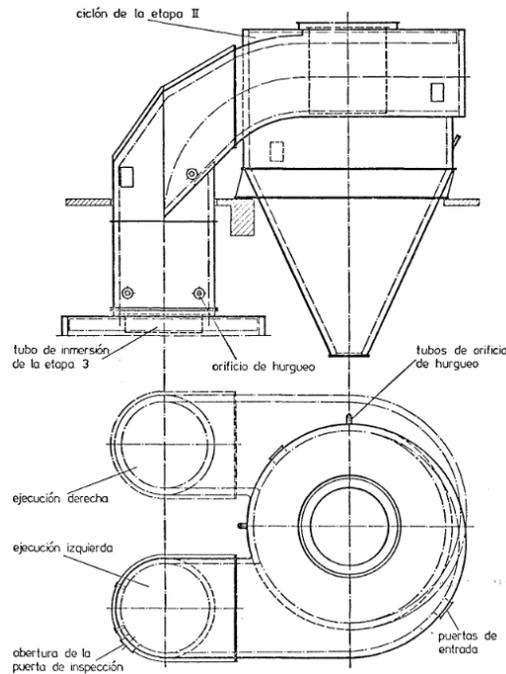


Fig.1.4 Intercambiador de calor ciclónico.

Fuente: Fuente: DUDA, W . H. Cement Data Book, Bauverlag GmbH, Wiesbaden y Berlín.

Para un intercambiador de calor de 4 etapas, se plantea que 80 % del intercambio térmico se produce en los tubos de ascensión de gases y solamente 20 % en los ciclones por tal motivo es importante mantener no solo el rendimiento de la unidad de 4 etapas en total, sino la eficiencia de cada ciclón. En este sentido es importante para la eficiencia térmica las temperaturas de salida de los gases del horno superior a los 1300 °C, así como los espesores de aislamiento necesarias con productos refractarios para evitar las pérdidas de calor.

1.4 Aislamientos térmicos. (RINCON J. 2009)

Los aislamientos térmicos son materiales o combinaciones de éstos que se usan para suministrar resistencia al flujo de calor. La mayor parte de ellos son materiales heterogéneos, los cuales tienen baja conductividad térmica y contienen bolsas de aire. Esto no es sorprendente, ya que el aire tiene una de las conductividades térmicas más bajas y se dispone de él con facilidad. La fuerza impulsora para el flujo de calor es la diferencia de temperatura y entre más grande sea, mayor será la velocidad de transferencia de calor. Los aislamientos térmicos actúan como barreras que retardan el flujo de calor entre dos medios a diferente temperatura.

El calor se genera en hornos o calentadores al quemar un combustible como gas natural o diésel, que se absorbe en el hogar y sus superficies, lo cual causa una elevación por encima de la temperatura ambiente. Esta diferencia de temperatura produce la transferencia de calor del medio caliente hacia el ambiente; el aislamiento reduce la pérdida de calor y, de este modo, ahorra combustible y dinero. Por lo tanto, el aislamiento se paga por sí mismo gracias a la energía que ahorra. Aislar de manera apropiada requiere de inversión de capital, pero sus efectos son espectaculares y de largo plazo. El período de recuperación de la inversión a menudo es menor a un año. Aunado a estos ahorros, el aislamiento también ayuda al medio ambiente y combate la contaminación del aire y el efecto invernadero al reducir la cantidad de combustible que se quema y, de este modo, la cantidad de CO₂ y otros gases que se liberan a la atmósfera. Anexo I.

En la siguiente gráfica se muestra que es necesario determinar el valor óptimo del espesor de refractario que garantice que los costos del calor perdido y del aislamiento alcancen valores mínimos o sea el costo del combustible asociado a las pérdidas sea igual al costo del refractario.

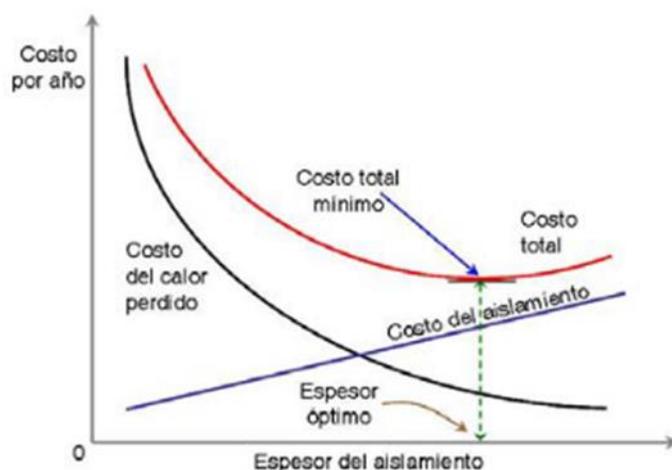


Fig. 1.5 Costos de las pérdidas de calor y del aislamiento térmico.

Fuente: (Taborda J.M. 2009)

Se debe tener conciencia de que el aislamiento no elimina la transferencia de calor; simplemente la reduce. Entre más grueso sea el aislamiento, menor será la transferencia de calor, pero también más elevado el costo del aislamiento. La máxima transferencia de calor

de un sistema al ambiente se deriva de establecer un balance económico con respecto al espesor del aislante, entre los costos de los diferentes componentes del sistema termoaislante (costos fijos, ascendentes) y los costos de energía térmica desperdiciada (costos de operación, descendentes), ya sea para alta o baja temperatura.

Con frecuencia se tienen varios aislamientos adecuados para un fin y el proceso de selección puede ser un tanto confuso, ya que cada aislamiento tiene conductividad térmica, costo de instalación y vida de servicio diferentes. En estos casos, se puede hacer una selección mediante una gráfica de costo anualizado contra espesor, para cada aislamiento y determinar el que tenga el costo mínimo más bajo:

El empleo de materiales refractarios en el proceso de clinkerización constituye un factor de importancia decisiva para el cumplimiento de los objetivos de la industria cementera: la producción de un cemento de óptima calidad al menor costo de fabricación posible. En la operación del Homo Rotatorio únicamente puede anteponerse al rendimiento y la calidad del clinker producido, la seguridad del personal y las instalaciones tecnológicas; por tal razón, al existir condiciones de peligro de sobrecalentamiento de la chapa metálica, por problemas en el refractario o la costra que lo protege, se deben realizar maniobras operativas orientadas a superar la situación de peligro, pero que pueden afectar gravemente los récords de producción e, incluso, la calidad del clinker almacenado. (FLSMIDTH, 2018).

El término refractario significa que un material puede emplearse a temperaturas desde aproximadamente 600 °C hasta aproximadamente 1.700 °C. De los materiales básicos así como minerales aluminosos y ricos en magnesia se desarrollan ladrillos, hormigones y productos conformados adaptados perfectamente a los materiales a procesar, las correspondientes temperaturas y los procesos de producción. Gracias a esta tecnología base, se instalan revestimientos refractarios altamente especializados en hornos industriales modernos de las industrias del cemento, del acero, del aluminio, de metales no ferrosos, del vidrio y de la industria química en todo el mundo.

El refractario, que en general se dispone directamente sobre la chapa, ha de cumplir las siguientes funciones;

1. Aislar térmicamente el recinto interior del sistema del medio ambiente, a través de la chapa, buena conductora del calor.
2. Constituir un buen substrato para la iniciación de la formación de costra y su conservación en la zona donde aquélla se establece (zona de reacción y clinkerización).
3. Permitir al horno una actividad con el mayor intervalo de tiempo posible y con un espesor tal que dé lugar a un gradiente de temperatura que haga que la de la chapa no alcance valores inadmisibles, para su integridad (aparición de la Rrosa» o «roseta», equivalente a incandescencia de aquélla, en léxico cementero).
5. Minimizar las pérdidas de calor al medio por procesos de convección y radiación.
Reducir la pérdida o ganancia de calor y por lo tanto reducir la cantidad de energía necesaria para mantener el equilibrio del proceso y por lo tanto ahorrar de costes. Optimizando el aislamiento se reducen los costes de instalación proporcionando el máximo ahorro de energía durante la vida útil de la instalación.
6. Reducir impactos en el Medioambiente
Optimizar la eficiencia de aislamiento para maximizar el potencial de ahorro de CO₂ (reducción de costos de emisión de CO₂), así como proporcionar una protección contra futuros costes de la energía. El uso de materiales y sistemas innovadores de aislamiento, tales como los sistemas de *baja emisividad*, ayudan a proporcionar el máximo ahorro de energía potencial a la vez que mejoran la protección del medio ambiente en el equipo industrial.
7. Mejorar la sostenibilidad a través de la máxima eficiencia energética
La gama de refractarios está diseñada para proporcionar una conductividad térmica óptima para cada aplicación. La conductividad térmica del aislamiento se mide en la escala de temperatura de acuerdo con norma, para los productos planos y para las secciones de la tubería.
El rendimiento térmico de los refractarios, está garantizado por un estricto control de calidad, tanto interno como externo.

En el sistema Horno - Intercambiador - Enfriador, con o sin cámara de Precalcinación, las condiciones a que está sometido el revestimiento refractario será de la mayor variedad y exigencia para cada zona, pero resulta de gran importancia considerar que, cada punto del sistema, requiere el máximo de atención, observación y control desde la toma de decisiones

para el diseño original, su control y evaluación en trabajo y los posibles ajustes para el recambio o reparación. (anexo II)

El material ingresa en el ducto que asciende con gases hacia la primera atapa de cicloneo a unos 60° C, pasando sucesivamente a través de las otras etapas y llegando al Horno, o la cámara de pre-calcinación, a unos 700-800° C. Los gases ingresan provenientes del Horno a aproximadamente 1.000-1.100° C, dejando el Intercambiador a 350-400° C luego de ceder su calor al material en los ductos ascendentes (80 %) y en los ciclones. (Anexo III)

Dentro de estos rangos de temperatura se produce la exigencia térmica a que será sometido el refractario. Las condiciones abrasivas del material revisten mayores exigencias, considerando la acción de las partículas arrastradas por los gases sobre las paredes de los tubos de ascensión, los ciclones y los tubos de descarga, a velocidades que pueden ser considerables. La abrasividad del polvo varía de acuerdo a su contenido de sílice y tamaño de las partículas, pero dentro de un estrecho margen, por lo cual puede ser cuantificado su efecto convenientemente.

El aspecto que quizás requiera mayor atención en esta etapa, por ser el que produce mayores daños y condiciones agresivas, es el de incrustaciones y ataque químico, especialmente por la presencia de álcalis, cloruros y sulfatos en el crudo y el combustible. Estos materiales se volatilizan en el Horno y forman circuitos internos, concentrándose en las últimas etapas del Intercambiador, que crean condiciones propicias para que se produzcan incrustaciones, pegaduras y atoros de material, con gravísimas consecuencias para la continuidad y normalidad del proceso, por lo que debe considerarse en el diseño de refractario las condiciones que faciliten la limpieza de incrustaciones sin daño del mismo.

En la Cámara de Precalcinación, la exigencia térmica resulta bastante fuerte debido a la presencia de quemadores de combustible que pueden alimentar aproximadamente el 60 % del total; considerando que el crudo es descarbonatado en un 90 % y esta reacción es fuertemente endotérmica, la transferencia de calor en el interior de la cámara es máxima. El fundamento mismo de la Precalcinación se basa en la máxima exposición de la superficie del crudo y el inmediato aprovechamiento del calor producido al combustionar, por parte de las partículas de polvo que deben encontrarse en los alrededores; cumpliéndose este efecto

no existe peligro de sobrecalentamiento en las paredes del refractario, pero el mismo puede producirse por una deficiencia en el equilibrio perfecto que debe mantenerse.

Las instalaciones con el sistema de Precalcinación deberán considerar condiciones más exigentes desde el punto de vista térmico y, consecuentemente, un cuadro diferente en lo referente a presencia de volátiles que deberá ser cuidadosamente planificada. La diferencia entre las condiciones de trabajo del refractario en el Horno Rotatorio, respecto al Intercambiador y Enfriador, es bastante notable en razón de los esfuerzos mecánicos a que se somete durante el giro del Horno, lo cual debe ser tomado en cuenta en el diseño y colocado.

Debe procurarse un equilibrio entre las condiciones óptimas para preservar la costra y evitar pérdidas de calor al exterior. Pueden considerarse 4 zonas de características bien definidas a lo largo del Horno Rotatorio, las cuales ofrecen diversas condiciones que debe soportar el refractario. (Anexo IV)

1. Zona de Calentamiento o Descarbonatación

En lo referente a exigencia térmica, aunque no se presentan aún temperaturas altas, la característica de reacción fuertemente endotérmica de la descarbonatación exige la ubicación de ladrillo aislante. La abrasión representa una exigencia mayor en el anillo de entrada de material y el ducto de gases, siendo considerable en toda la zona que no forma costra protectora. Pueden producirse problemas importantes debido a la formación de pegaduras y reacciones químicas por la presencia de ciclos de volátiles, principalmente sulfatos y cloruros alcalinos.

2. Zona de Transición y Nodulización.

Exige condiciones térmicas que pueden variar dentro de un espectro amplio, de acuerdo a las variaciones operativas del sistema; a diferencia de las zonas anteriores la temperatura, en la zona más alta, ya requiere una especial resistencia por parte del refractario, llegando a 1.300-1.350° C. Al comenzar a formarse la fase líquida en esta zona, varían las condiciones fisicoquímicas del medio en que se desarrollan las reacciones del proceso y las que debe soportar el refractario.

Las características de la fase líquida formada, influenciada por la temperatura en aumento progresivo, resultan determinantes en la posibilidad de formación de una costra que puede proteger convenientemente el ladrillo en esta zona pero, con frecuencia, llega a formar los anillos que causan serios problemas operativos y, al derribarlos, dañan el refractario de la zona. La tensión superficial y la viscosidad de la fase líquida deben ser controladas de tal manera que la Nodulización se produzca adecuadamente y en el momento conveniente, lo que además de resultar decisivo para el proceso y la calidad del clinker producido, favorecerá la duración del refractario.

3. Zona de Clinkerización.

Es la etapa culminante del proceso y, a su vez, la que resulta más exigente para el refractario. La temperatura puede alcanzar hasta 1.500° C y, a tales condiciones de exigencia térmica, se suman: la abrasión del clinker formado, la corrosión creada por la reactividad del material y las exigentes tensiones mecánicas creadas por la dilatación térmica de la chapa metálica, el refractario y la costra formada, la torsión creada por el giro del horno, la presión de los ladrillos producto de la pendiente del Homo, la fuerte variación de temperaturas de exposición a que se somete el ladrillo en cada revolución del horno.

Estas condiciones tan exigentes motivan que, para la protección del ladrillo refractario, presente la particularidad de constituir —por reacción con el clinker en formación— una costra protectora de cuya estabilidad dependerá, en gran parte, el rendimiento del refractario. El equilibrio entre corrosión e incrustaciones de la costra ya formada representa un complejo problema dependiente de muchos factores, cuyo conocimiento y control permitirá alcanzar los objetivos del proceso.

4. Zona de Enfriamiento

En la zona que transcurre el material, hasta su caída al enfriador, las condiciones térmicas para el refractario son bastante exigentes, disminuyendo gradualmente hacia la boca del Horno. Las condiciones varían de acuerdo a la posición del quemador respecto al anillo de salida. Las condiciones de abrasión, por parte del clinker formado, se hacen más exigentes en los últimos 2 ó 3 metros, porque generalmente no se forma costra. En esta zona pueden mencionarse las condiciones que se presentan en el cabezal o caperuza del Horno, y que debe soportar el refractario de protección. Además de la temperatura elevada y variable, se

debe mencionar la abrasión del polvo de clínker arrastrado por el aire secundario proveniente del enfriador.

En el enfriador de parrilla no se presentan mayores exigencias para el material refractario, pero en muchos casos sucede todo lo contrario. La exigencia térmica puede representar problemas únicamente en la zona de conexión con el Horno, donde también se produce abrasión por las partículas que arrastra el aire secundario. La zona de caída de material del Horno es sometida a fuertes esfuerzos de impacto y abrasivos y, de formarse el "snowman" (hombre de nieve o árbol de navidad) por aglomeración del clínker, al removerlo se puede dañar gravemente el revestimiento refractario. Las vibraciones y sacudidas que producen las parrillas en movimiento pueden afectar la estabilidad del refractario exigiendo, por ello, especial atención su colocado y diseño.

Finalmente las pérdidas de calor por radiación en el sistema horno precalentador representan aproximadamente el 10 % del consumo en kcal/kg de clínker, por lo cual la capacidad de aislamiento representa un permanente objetivo de control y mejoramiento mediante mejores diseños y sistemas.

CAPITULO 2.

Capítulo II. Descripción del objeto de estudio y metodología a emplear.

En este capítulo se realiza la caracterización de la empresa mixta Cementos Cienfuegos S.A. se describen los principales equipos que componen la instalación de piroproceso finalmente se estructura la metodología para la realización del estudio de factibilidad.

2.1 Descripción del objeto de estudio.

En el mes de Junio de 1975, se confeccionó el expediente de Tarea de Inversión para la Fábrica de Cemento de Cienfuegos, donde se planteó la localización del lugar destinado para la construcción de las instalaciones, la red de comunicación vial necesaria, las fuentes de abasto de agua y las soluciones a gestionar para la fábrica. Finalmente se localizó sobre áreas de la Llanura de Cienfuegos a los 22° 09' 20" de Latitud Norte y los 80° 15' 19" de Longitud Oeste

El 8 de marzo de 1980 comienza la explotación del primero de los tres hornos de la Fábrica de Cemento de Cienfuegos, lo cual permitió un aumento considerable en la producción nacional de este renglón. La Fábrica de Cementos "Karl Marx", fue inaugurada por el Comandante en Jefe Fidel Castro Ruz y el presidente de la RDA "Eric Honeker". La Fábrica la conformaban tres líneas paralelas de producción con una capacidad instalada de 1500000 t/a de clínker (tres Hornos rotatorios de 500000 t/a de clínker), con tecnología de producción de vía seca que se mantiene hasta hoy.

Después de 21 años de explotación., en el año 2001 se decide la constitución de las Empresa Mixta Cementos Cienfuegos S.A. perteneciente al Ministerio de la Construcción que comienza con un proceso de mantenimiento general a la línea I, continuando con la rehabilitación y modernización de la línea 3, para restablecer su capacidad productiva y alcanzar su capacidad de diseño. En noviembre del 2004 se realiza la puesta en servicio de la línea III. Es una empresa mixta, , destinada a la producción y comercialización de clínker y cemento consignados a clientes nacionales y extranjeros, la mayor en Cuba y una de las más grandes de Latinoamérica

El comportamiento productivo de la Fábrica ha ido en ascenso. El año 2007 cerró con una producción superior al Millón de toneladas de clínker y se implantaron nuevos record

históricos de producción para un mes. En el año 2009 se alcanzó la mayor producción registrada desde su reestructuración llegando al millón ciento seis mil toneladas de clínker.

En la actualidad mantiene certificado su sistema de gestión integrado de Calidad, Medio Ambiente, Seguridad y Salud en el Trabajo y Energía sobre las normas, NC-ISO 9001:2015; NC-ISO 14001:2015, NC- 45001:2018 y NC ISO-50001:2019 os de acaba de ser certificado por la ONN.

La empresa produce gran parte de la producción de cemento del país. En la misma se procesa el clínker y cemento con alta calidad y con poca contaminación de la atmósfera. Entre los logros más significativos después de la constitución de la empresa mixta están:

- ✓ Empresa Libre de CFCs desde el año 2009.
- ✓ Empresa Responsable con el Medio Ambiente desde el 2009.
- ✓ Premio de la Provincia de Cienfuegos a la Calidad año 2011.
- ✓ Premio Nacional del Ministerio de la Construcción 2017 a la Calidad de los productos Clíner, Cementos P 35 y PP 25.
- ✓ Premio Nacional del Ministerio de la Construcción 2017 de Medio Ambiente.
- ✓ Premio de la Provincia de Medio Ambiente 2019.

La empresa tiene como Objeto Social la modernización, rehabilitación, optimización, operación, mantenimiento, ampliación de la capacidad y explotación de la planta, la explotación, extracción, transporte y proceso industrial de los minerales de calizas, margas, tobas, limonitas y areniscas ubicados en los yacimientos autorizados en las concesiones mineras que se transferirán o que posteriormente se otorguen, así como la producción, exportación almacenamiento, transporte terrestre y marítimo, distribución, comercialización de clínker, cemento, aditivos de cemento y modificantes especiales de cemento.

Misión. Producir y exportar clínker y cemento, garantizando la sostenibilidad de la empresa, el entorno y la sociedad.

Visión 2021. Ser productora y exportadora de clínker y cemento líder en Cuba y el Caribe a través del:

- ✓ Uso eficiente de recursos energéticos.
- ✓ Co-procesamiento de desechos.

- ✓ Desarrollo de las personas.
- ✓ Innovación de productos

Valores:



Fig. 2.1 Valores compartidos en Cementos Cienfuegos S.A.

Persona: Las personas constituyen el valor más importante que garantiza nuestro futuro. El verdadero éxito de la empresa, está en lo que realmente sienten, piensan e interpretan las personas y sobretodo en la capacidad de reconocerlo, organizarlo y utilizarlo: son los protagonistas.

Seguridad: El uso de equipos de seguridad, la evaluación preventiva de las condiciones de trabajo y actuar de forma segura, es la norma de conducta de todos los trabajadores, que nos permitirá conservar nuestra integridad

Disciplina y Trabajo en equipo: Juntos perseguimos un objetivo en común, la participación y ayuda mutua son factores esenciales.

Gestión de excelencia y Calidad: Para nosotros la calidad es la gestión de excelencia en todo lo que hacemos, estamos fuertemente comprometidos con la satisfacción de nuestros clientes.

Medio Ambiente: Estamos comprometidos con el medio ambiente en las actividades que realizamos. Salvaguardar el medio ambiente. Es un principio rector de todo nuestro trabajo.

Rentabilidad /Productividad: Rentabilidad, es el oxígeno que permite a nuestra empresa seguir viviendo; la Productividad es eficacia más eficiencia, es nuestro ideal.

Confianza: Conseguiremos lo que deseamos, pues confiamos en la integridad, el carácter y la habilidad de nuestros líderes y colaboradores. La confianza se merece, no se impone, se gana con tiempo y esfuerzo.

Cementos Cienfuegos SA cuenta con un total de 244 trabajadores distribuidos de la siguiente forma según sexo y categoría ocupacional según plantilla aprobada.

Tabla 2.1 Composición de la fuerza de trabajo de Cementos Cienfuegos S.A.

Categoría Ocupacional	Total
Obreros	326
Técnicos	51
Servicio	5
Dirigentes	34
Administrativos	4
Total	420

Dentro de sus principales clientes: La producción de cemento es destinada íntegramente a la Unidad de Base Empresarial Comercializadora de Cemento (UBECOCEM); y el clinker se comercializa con Hansen Holding S.A por convenio entre las partes.

Sus principales Proveedores: Geominera; Empresa de Asistencia y Servicio Cienfuegos; Empresa de Mantenimiento Cemento Vidrio; Acueducto y Alcantarillado Cienfuegos; Unidad Básica Empresarial Eléctrica Cienfuegos; CUBALUB, REFRACTECNIC, UDECAM, CUBIZA, IZAJE, SEPSA; CEDAI; COMETAL; MIMVEX; TRASMETRO; Ferrocarriles; Empresa de Transporte (ETEP); Cubana de Aviación; Cuba Control; SERVITALLE; MAMBISA; AGR; Centro Nacional para la Certificación Industrial (CNCI).

2.2 Descripción del Proceso productivo.

En la empresa de Cemento Cienfuegos S.A., el proceso de producción del cemento se divide en tres etapas: materias primas, clinkerización y cemento. A continuación, se

desarrolla resumidamente cada etapa y en el Anexo V se muestra el esquema tecnológico de la instalación general.

El proceso de fabricación de cemento comienza en las canteras, con la extracción de las materias primas (Caliza, tobas puzolánicas, marga y mineral de hierro), las cuales se encuentran en la cantera a cielo abierto. Después de su extracción y clasificación, el material procede a su trituración y secado hasta obtener una granulometría adecuada para la dosificación y molienda de crudo y obtener la harina cruda.

El proceso de clinkerización (Piroproceso) consiste en llevar la harina cruda homogenizada al horno rotatorio previo proceso de calentamiento para la descarbonatación, en la salida del horno se produce la fusión de varios componentes y se forman gránulos conocidos como clinker. Este proceso incluye las siguientes sub etapas: transporte de alimentación de harina cruda, precalentamiento, clinkerización, enfriamiento, trituración, transporte de clinker y alimentación del combustible.

La molienda de Cemento por su parte comprende el almacenamiento de y la dosificación de Clinker y los aditivos de yeso, caliza y puzolana, para su posterior envío a los molinos para la fabricación de cemento en sus diferentes calidades (P-35, PP-35, PZ-25, CA, cementos calizo, etc.) y finalmente su almacenamiento en silo para su posterior despacho a granel (ferrosilos, autosilos) y en bolsas para su comercialización en el mercado nacional e internacional.

2.3 Corrientes calóricas de entrada y salida del sistema.

En el gráfico de la figura 2.2 se muestran las entradas y salidas de energía calórica del sistema precalentador, horno, enfriador. De donde las flechas de colores rojo indican el calor que ingresa o egresa asociado a un material que sale o entra, mientras que el color negro indica que hay corrientes asociadas, pero que el calor no entra ni sale del sistema. Además está el color azul que indica que hay calores que ingresan o egresan del sistema, pero que no están asociadas a ninguna corriente del balance de masa y en su mayoría están asociadas a pérdidas.

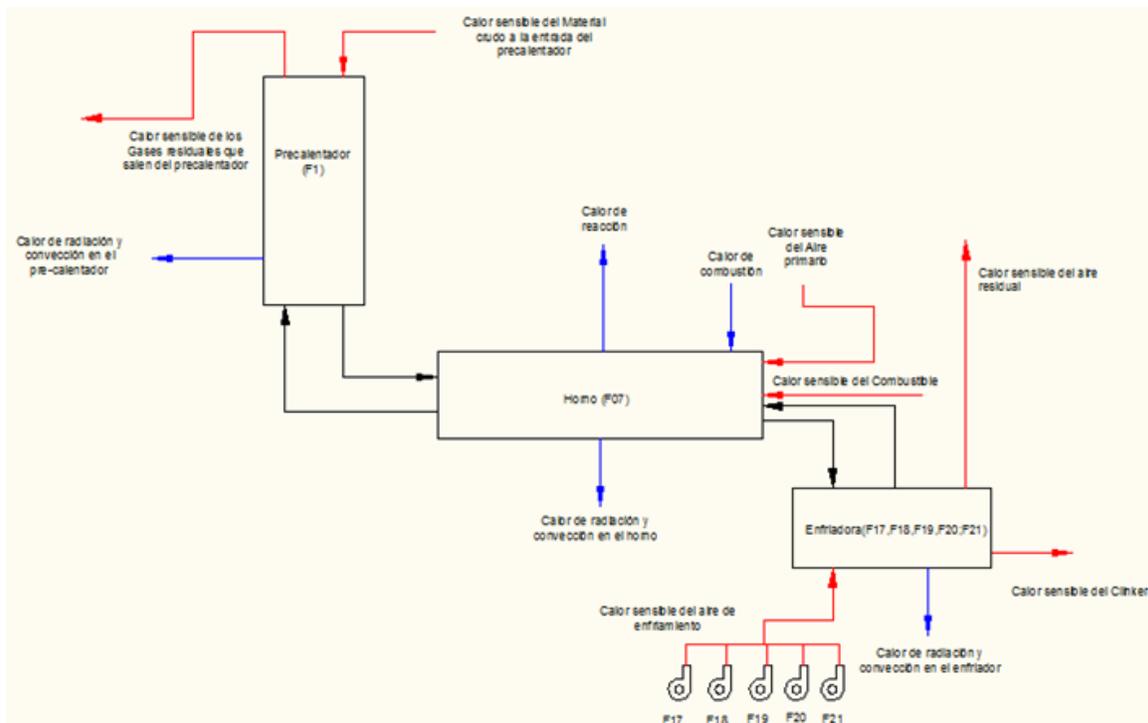


Fig. 2.2. Diagrama de entradas y salidas de energía en el sistema pre-calentador-horno-enfriador.

Fuente: Elaboración propia

Corrientes calóricas de entrada al sistema

- ✓ Calor sensible de la alimentación de crudo (crudo): la temperatura de esta corriente es cercana a los 47 °C.
- ✓ Calor sensible del combustible: debido al calentamiento que recibió esta corriente antes de ingresar al sistema, la temperatura está cerca de 130 °C.
- ✓ Calor sensible del aire primario: como este aire es llevado desde el ambiente por el ventilador que controla su paso, esta corriente lleva una temperatura cercana a la ambiental.
- ✓ Calor sensible del aire de enfriamiento: este flujo tiene una temperatura también cercana a la ambiental.
- ✓ Calor sensible de aires falsos: esta es la corriente que se cuela desde el ambiente, por lo que tendrá una temperatura parecida a este y generalmente en los balances suele despreciarse.

- ✓ Calor de combustión: este es el calor aportado por el combustible, durante su quema. Este valor, va a depender de la cantidad de combustible alimentado y de su poder calorífico.

Corrientes calóricas de salida del sistema

Calor sensible del Clinker: ésta corriente de salida del sistema tiene una temperatura variable entre 90 °C a 130°C, dependiendo de la eficiencia con la que opera el enfriador de clinker.

Calor de evaporación del agua del crudo: éste calor es el calor aprovechado por el agua de crudo para cambiar su estado de estado líquido a gaseoso, pasando a formar parte luego de los gases de salida del pre-calentador.

Calor sensible del aire residual: ésta corriente luego de haber enfriado el Clinker a la salida del horno, es calentado bastante, por lo que su temperatura a la salida del sistema es cercano a 290°C.

Calor sensible del polvo de Clinker recuperado en el filtro de mangas: debido a que esta corriente sale junto con el aire residual, su temperatura sería, si no la misma, muy parecida.

Calor sensible de gases de salida del pre-calentador: a la salida del precalentador, antes de llegar al ventilador de tiro que le obliga a bajar por el ducto “downcomer”, tiene una temperatura cercana a 360°C.

Calor sensible del polvo de crudo recuperado del colector de polvos: debido a que esta corriente sale junto con los gases de salida del pre-calentador, su temperatura sería, si no la misma, muy parecida

Pérdidas de calor por radiación (q_{rad}): para averiguar cuánto de energía se pierde de esta forma dividimos en pérdidas por radiación tanto en el pre-calentador, horno y en el enfriador. La radiación es la energía que se emite por un cuerpo, debido a su temperatura. La radiación se da sin la necesidad de que los cuerpos estén en contacto entre sí y la transferencia de calor depende de la diferencia de temperatura entre los 2 cuerpos.

Pérdidas de calor por convección: para esta energía también tomamos en cuenta los tres equipos por separado. Este tipo de calor se pierde por medio de un fluido, en nuestro caso el aire, que transporta el calor entre zonas con diferentes temperaturas, es decir se transporta el calor por medio del fluido.

2.4 Proceso de Clinkerización.

El proceso de clinkerización se define como la transformación de la harina cruda en clinker, a través de los procesos de precalentamiento, descarbonatación, calentamiento, clinkerización y enfriamiento. Estos procesos se desarrollan por etapas en la torre precalentadora, horno rotatorio y enfriador.

El proceso de clinkerización comienza con el ingreso de la harina cruda a la torre precalentadora, donde es descarbonatada por medio la transferencia de calor entre los gases, con altas temperaturas, provenientes del horno; este proceso ocurre en los ciclones y el calcinador. Después la harina precalentada y descarbonatada o parcialmente descarbonatada ingresa al horno rotatorio, donde se dan las fases de calentamiento, clinkerización y enfriamiento parcial.

2.5. Funcionamiento de la torre precalentadora.

En la torre precalentadora ocurren los procesos de descarbonatación de la caliza para obtener el CaO (óxido de calcio), así como, la eliminación por calcinación de las materias orgánicas y el agua químicamente enlazada, con el objetivo de garantizar la combinación de los óxidos presentes en las materias primas para la formación de las fases mineralógicas del clinker (C_2S , C_3S , C_4AF , C_3A , etc.). En general está compuesta por ciclones, tuberías y el calcinador.

La torre precalentadora consta de 4 etapas de precalentamiento o ciclones de separación gas sólido, que actúan como intercambiadores de calor. En la primera etapa existen dos ciclones gemelos, cuya eficiencia es mayor, también cuenta con un calcinador en línea, donde la descarbonatación se da en su totalidad en el resto de los ciclones. Durante el proceso de intercambio de calor los ciclones van perdiendo eficiencia en el cicloneo, debido a la separación que ocurre en cada ciclón, en función de la velocidad, geometría y tubo de inmersión. Las eficiencias decaen de 93% en el primero ciclón, hasta 78% en el último

ciclón. En la Figura 2.3 se muestra la torre precalentadora y sus componentes, lo cuales son descritos a continuación.

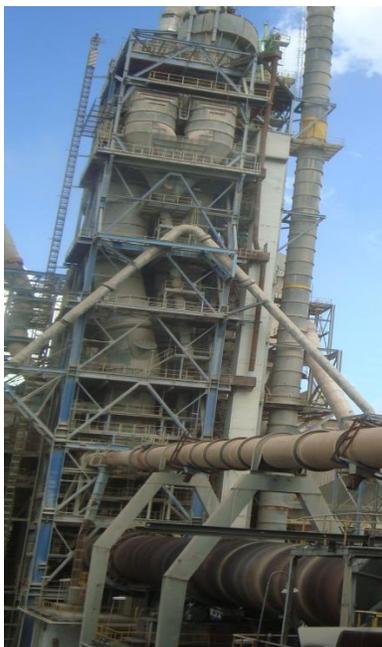


Fig. 2.3 Torre precalentadora de la línea III

En su conjunto el precalentador de calor trabaja en contracorriente de modo gradual y el crudo accede, tramo a tramo, a gases de temperatura siempre creciente hasta que se llega a la temperatura de entrada al horno. El precalentador utiliza básicamente el intercambio de calor en flujo en paralelo. La eficiencia térmica se mejora dividiendo al sistema en paralelo en una serie de tramos individuales. Utilizando todo el caudal de gases de escape que se producen en el horno durante la cocción del clinker y aprovechando la energía calorífica que contienen (La temperatura de salida de los gases del horno oscila entre 1050 °C y 1250 °C), se somete al crudo a un tratamiento térmico primario, precalentamiento y descarbonatación parcial (hasta el 35-40 %), antes de su entrada al horno. Durante dicho tratamiento la temperatura del crudo pasa de 50 °C a 780 °C - 830 °C y la de los gases residuales del horno desciende hasta valores de 300 - 360 °C. El contenido térmico de esos gases de salida del precalentador con una temperatura final de 330 °C, permite utilizarlos aún para el secado de las materias primas con un contenido de humedad del 8 - 9 % en los molinos de crudo. En la Figura 2.4 muestra el gradiente de temperatura en el precalentador.

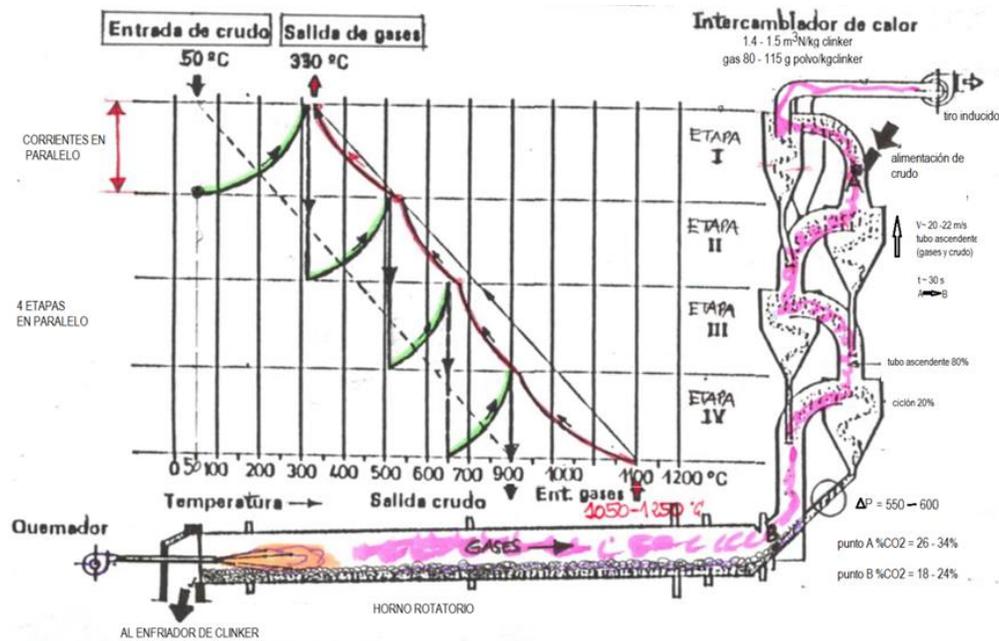


Fig. 2.4 Intercambiador de calor de ciclones de 4 etapas. Temperatura de gases y de material en los tramos individuales, que corresponden a 4 intercambiadores en paralelo.

Los ciclones están conectados entre sí por tuberías ascendentes de sección cuadrada, pero la tubería superior es de sección circular. Cada ciclón y su tubería forman un tramo del intercambiador, tramos que van numerados del I al IV de arriba a abajo. Las tuberías de salida del crudo de los ciclones desembocan en las tuberías de gases ascendentes del tramo situado debajo. La tubería de salida del crudo del tramo IV desemboca en la entrada del horno rotatorio. Figura 2.4. El crudo se alimenta dentro del conducto ascendente que va al ciclón I (Entre los tramos I y II), siendo arrastrado hacia él por la corriente gaseosa. Para lograr una separación mejor y evitar que marche polvo de crudo con los gases, el último tramo, situado en la parte superior, está dispuesto como ciclón doble.

El crudo después de ser separado de la corriente gaseosa se descarga en el conducto ascendente que va al ciclón II (Entre los tramos II y III), siendo arrastrado hacia él por la corriente gaseosa. En el ciclón II el crudo se vuelve a separar de la corriente de gases y se descarga en el conducto ascendente que va al ciclón III (Entre los tramos III y IV), siendo arrastrado hacia él por la corriente gaseosa. Se sigue de igual modo, hasta que se llega a la separación del ciclón IV donde el material ya se introduce en el horno resbalando por las

paredes, para que no sea arrastrado por la corriente de gases. El tiempo aproximado que tarda el crudo desde que es alimentado en el precalentador hasta que llega al horno es de 25 - 30 segundos. La altura de la torre intercambiadora de calor es de unos 50 m. La transferencia de calor (Intercambio térmico) tiene lugar, fundamentalmente, en los 4 conductos ascendentes, en una corriente de la misma dirección para el crudo y los gases de salida del horno, y la función básica de los ciclones es la de separar los dos medios (crudo y gases), después del intercambio de calor. Se estima que el 80 % de la transferencia de calor tiene lugar en los conductos ascendentes y el 20 % restante en los ciclones, La diferencia de temperatura entre los gases y el crudo que salen de cada tramo puede verse en el propio gráfico. Se observa que la diferencia de temperatura es de 20 - 40 °C, aproximadamente, lo que demuestra que el intercambio de calor es bastante favorable.

2.5.1 Ciclones en Precalentadores de Suspensión.

Tienen la función de transferencia de calor desde los gases calientes del horno hacia la harina cruda fría. Su principio de funcionamiento se basa en el intercambio de calor en contra-corriente, donde la harina dispersa en la corriente de gases calientes, es conducida por el flujo de gases suspendidos, de manera que el calor se intercambia hasta que las temperaturas se igualen. La harina caliente se separa de los gases fríos y desciende por cada ciclón hasta el horno. La mayor parte de transferencia de calor se realiza por los tubos de salida de gases de cada ciclón, equivalente al 80%, el 20% del intercambio calórico ocurre en el interior de los ciclones. La harina que ingresa al proceso, es alimentada a través del ciclón 2, con una temperatura cercano a los 50°C, calentándose hasta, aproximadamente, 900°C durante un tiempo de residencia en la torre de, aproximadamente 30 segundos.

En las figuras siguientes se muestran los elementos componentes principales de las etapas de ciclones del precalentador: ciclón donde se produce la separación del polvo de la corriente de gases, ducto de inmersión colocado en el interior del ciclón a la salida de los gases para aumentar el tiempo de retención de la mezcla de gases y polvo para aumentar la eficiencia de separación. Válvulas pendulares para el cierre de las diferentes etapas con el objetivo de impedir la formación de by-pass en el ciclón.



Fig. 2.5 Ciclón



Fig.2.6 Ducto de inmersión

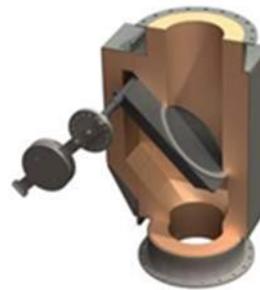


Fig. 2.7 Válvulas de cierre

El intercambiador de calor es una parte de una instalación de horno para cemento-clínker previo al calcinador y al horno rotatorio. Mediante el principio de contracorriente se precaliente la harina cruda mediante el flujo de gas ascendente por etapas, calcinándolo hasta un grado de descarbonatación de aproximadamente el 95%. En función de la humedad de la materia prima y la capacidad de la instalación se usan intercambiadores de calor de uno o dos tramos con tres, cuatro o cinco etapas de ciclón.

Las etapas superiores de los ciclones de un intercambiador de calor están expuestas a un ambiente termoquímico de baja a moderada, por lo que se emplean materiales refractarios de desgaste para el revestimiento en base a productos de chamota o SiO_2 KRONEX y REFRACLAY así como los productos REFRALITE. Las etapas inferiores del ciclón están expuestas a un ambiente termoquímico más elevado debido a la presencia de ciclos de cloro y alcalinos. Por este motivo, el revestimiento refractario de estas partes de la instalación requiere materiales con contenidos de alúmina específicamente adaptados. Las capas de aislamiento necesarias se ejecutan con productos refractarios ligeros así como materiales de silicato cálcico. En la figura 2.8 se muestra la disposición del refractario en los ciclones.



Fig. 2.8 Disposición del refractario en el interior del ciclón.

2.5.2 Calcinador

El calcinador sigue a la etapa más baja del ciclón. En esta parte de la instalación, la harina cruda se desacidifica/calcina hasta un grado de aproximadamente 95 por ciento. La aportación necesaria de energía (aproximadamente el 60 por ciento de la potencia calorífica total de la instalación) se realiza a través de los quemadores especiales del calcinador que funcionan tanto con materiales combustibles primarios como secundarios.

Después del calcinador se coloca la entrada del conducto de aire terciario, donde se inyecta gases caliente proveniente del enfriador como una medida de reducción de óxidos de nitrógeno. En este equipo la harina es 80% calcinada antes de ingresar al horno. En este lugar es importante el registro de indicadores como: la combustión completa identificado a través de la lectura de los gases en el analizador de gases del horno (O_2 , CO), tiempo de retención del gas y la proporción del combustible con la temperatura del aire terciario, para garantizar la economía energética del proceso. En el sector del quemador del calcinador existen elevadas exigencias al material refractario usado debido al uso de combustibles alternativos y regulares. Una elevada refractariedad y una buena resistencia termoquímica son de suma importancia en la selección de los materiales refractarios de desgaste seleccionados. Los suplementos de SiC así como óxido de circonio en los materiales refractarios aumentan la resistencia del revestimiento. Por encima de la alimentación de combustible en el calcinador, las temperaturas del proceso bajan a entre $850\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $900\text{ }^{\circ}\text{C}$. Los correspondientes sectores se dividen en la parte ascendente del calcinador, el desviador

de gas y la parte descendente. Las condiciones termoquímicas en estos sectores son la base para la selección de los refractarios con contenidos de alúminas muy específicos. En la figura 2.9 y 2.10 se muestran el calcinador y la disposición de los refractarios en su interior.

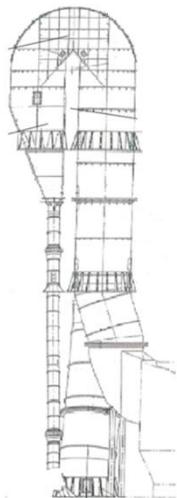


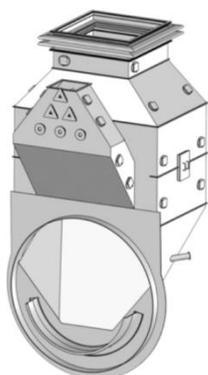
Fig. 2.9 Calcinador de harina



Fig. 2,10 Disposición interior del refractario.

2.5.3 Cámara de entrada.

La cámara de entrada es la conexión entre el precalentador, el calcinador y el horno rotatorio. Esta parte de la instalación se produce un traspaso del material lo más libre de polvo posible desde la parte estática a la parte dinámica de la instalación así como la introducción del gas del horno al calcinador. En la figura 2.10 y 2.11 se muestran la cámara de entrada y la disposición de refractario con los orificios de entrada de las resbaladeras de harina desde los ciclones.



2.11 Cámara de entrada



2.12. Disposición del refractario en su interior

Adicionalmente a la influencia termoquímica, la cámara de entrada sufre una influencia mecánica especialmente fuerte debido a los procedimientos de limpieza propios del proceso (p.ej. cañón de soplado y chorro de agua a alta presión). El uso de neumáticos enteros como combustible secundario también aumenta fundamentalmente la acción redox y de cambio de temperatura de esta parte de la instalación.

2.5.4 Horno de proceso seco

El horno es el lugar donde ocurren las reacciones para producir el clinker, componente principal del cemento. En su interior los procesos involucran reacciones físicas y químicas. Las reacciones físicas están relacionadas a las propiedades físicas de la harina cruda como la finura en el molino de crudo (gruesos de sílice o partículas gruesas de calcita). Por otra parte, los cambios químicos durante la quema están relacionados a la formación de las fases sólidas y líquidas de los minerales intermediarios y finales, dentro de sus funciones se destacan: de reactor químico, de generador de calor, de intercambiador de calor y de transportador de gases y sólidos.

El horno rotatorio de la Línea III consiste en un tubo de acero al carbono de 70 m de largo y diámetro interior de 4.2 m soportado en tres bases de hormigón, donde están instalados 2 rolos de deslizamiento donde se apoyan las llantas que permite el movimiento circulatorio del horno. Este movimiento se logra mediante un sistema cataliza piñón instalado en la base 1 accionado por un sistema motor-reductor de 440 V.

El espesor de la chapa del horno es variable con valores máximos en las virolas donde se instalan las llantas de apoyo, aunque en su interior el diámetro es uniforme, en la siguiente figura se muestra la disposición de las llantas/

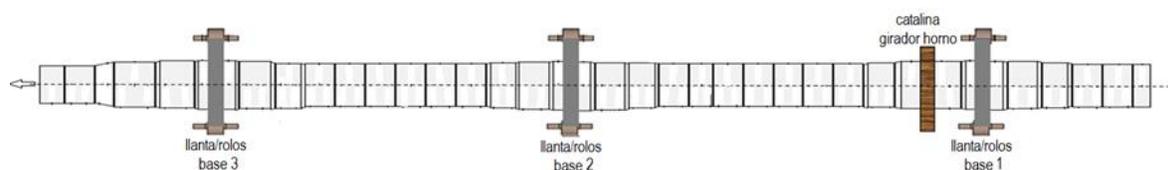


Fig.2.13 Horno rotatorio de línea III

Para un buen funcionamiento en el horno, es necesario que en su interior la temperatura de los gases evolucione de 1000°C a 1350°C, la llama a 1050°C, mientras que el material pase

de 850-900°C a 1420-1450°C y en la zona de clinkerización o de sinterizado, la temperatura sea como máximo 1450°C. Esta temperatura indica la transformación de C_2S a C_3S , el cual representa la calidad del clinker producido. Por motivos constructivos así como del proceso de producción, el horno rotatorio está sujeto a las más diversas influencias térmicas, químicas y mecánicas.

Especialmente debido al creciente empleo de combustibles alternativos, el revestimiento refractario se enfrenta a influencias termoquímicas así como termomecánicas elevadísimas.



Fig. 2.14 Disposición del refractario en el interior del tubo del horno.

2.5.4.1 Cabezal del horno.

En el cabezal se procede a la expulsión del material de clinker desde el horno rotatorio al enfriador. Al mismo tiempo, los gases del proceso se conducen desde el enfriador a través del cabezal del horno al horno rotatorio, además de conectarse el conducto de aire terciario. En las instalaciones más grandes, la conexión del TAD suele efectuarse poco después del cabezal del horno.

El quemador principal entra asimismo a través del cabezal en el horno rotatorio. Además, el cabezal permite el acceso al horno rotatorio para poder efectuar trabajos de reparación. Aparte de la alta influencia térmica del cabezal del horno, el creciente empleo de combustibles alternativos provoca también un aumento de la influencia termoquímica de los cabezales.

Por este motivo, la resistencia termoquímica es uno de los primeros criterios de selección los refractarios en esta zona. En las figuras 2.15 y 2.16 se muestra el cabezal del horno y la distribución de refractario en su interior

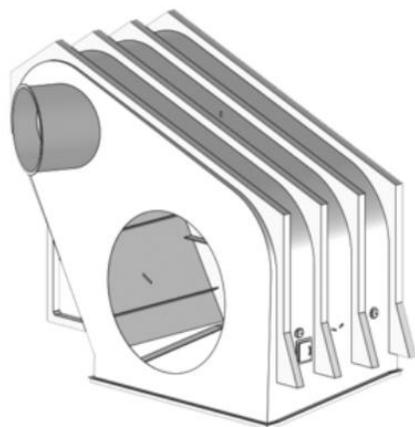


Fig. 2.15 Cabezal del horno

Fig. 2.16 Disposición del refractario

2.5.4.2. Ducto de aire terciario.

El conducto de aire terciario separa en el cabezal del horno el aire de combustión requerido en el calcinador y lo conduce paralelamente al horno rotatorio hasta el calcinador. Los sistemas de compuertas y válvulas regulan la cantidad del aire terciario. Gracias a este mecanismo, denominado también AS, Air Separate, la influencia del polvo en el horno rotatorio se reduce significativamente.

Las exigencias del refractario debido a la abrasión en codos y zonas de desviadores de gas se debe al elevado contenido de polvo de clínker que a veces se encuentra en el aire terciario. En algunas zonas aisladas también se producen influencias termoquímicas debido a álcalis contenidos en el flujo de gas.

La resistencia a la abrasión es el criterio prioritario del revestimiento refractario en esta parte de la instalación. Esto rige especialmente para el revestimiento de compuertas de aire terciario y sistemas de compuertas para regular la cantidad del aire terciario. En las figuras 2.17 y 2.18 se muestran el ducto de aire terciario y la distribución del refractario en su interior.

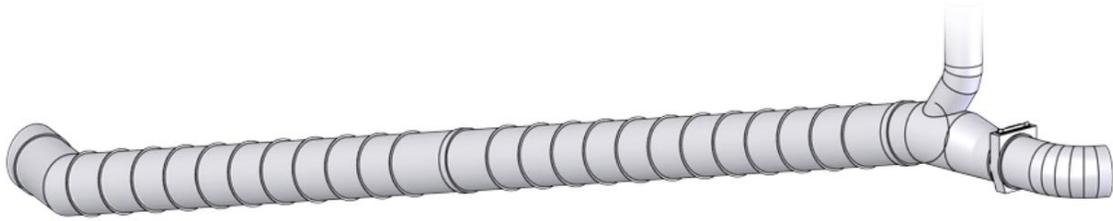


Fig. 2.17 Ducto de aire terciario



Fig. 2.18 Distribución del refractario en su interior.

3.5.5 Enfriador

El enfriamiento del clinker es la etapa final del proceso, se efectúa en la parte final del horno y el enfriador. Dentro del horno, el clinker disminuye su temperatura de 1450 °C a 1200°C, aproximadamente, hasta la solidificación de su fase líquida para ser descargado al enfriador tipo parrilla, donde la temperatura disminuye hasta menos de 100°C.

Además de la función de enfriamiento, el enfriador de clinker tiene otras funciones como recuperar el calor, transportar el clinker de la descarga del horno a la trituradora, dar una granulometría específica, mejorar la calidad del clinker a través un tiempo adecuado de enfriamiento, y mantener un régimen permanente y estable en el horno. En este sentido, el horno recupera, aproximadamente, de 15% a 25% del total del calor del enfriador como aire terciario a una temperatura de 700 a 1100°C, el cual es utilizado en la combustión del calcinador. Asimismo, la cámara del enfriador es importante para que el material obtenga sus propiedades físicas y químicas referentes a la molturabilidad, resistencia mecánica y durabilidad química. Los mecanismos de transferencia de calor, que involucra el

enfriamiento del clinker, son por conducción, convección y radiación; donde el calor del Clinker se desplaza del interior al exterior por conducción, a causa del gradiente de temperatura. El aire proveniente de los ventiladores fluye por la superficie del clinker y debido a la alta temperatura del material ocurre la transferencia de calor por convección y radiación.

En la Figura 2.19 se muestra el esquema del enfriador de 7 cámaras inferiores, la cámara 0 ubicada bajo el cabezal del horno y la cama de placas fijas (cámaras de 1 a 6) ubicadas bajo la cama de barras móviles. Estas cámaras cumplen la función de inyectar aire para el enfriamiento proporcionado por los 12 ventiladores para reducir la temperatura del clinker a lo largo del enfriador.

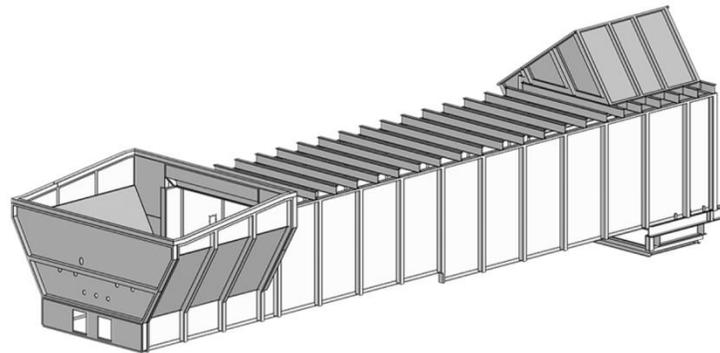


Fig. 2.19 Esquema estructural del enfriador de parrillas.

Las características del revestimiento refractario se caracterizan especialmente por ser resistente a condiciones termoquímicas y termomecánicas extremas. La distribución uniforme del lecho de clínker en la zona de recuperación hace que se alcancen temperaturas de aire secundario elevadas, que conllevan también a la formación de costras en la zona de caída del clínker. En la figura 2.20 se muestra la distribución del refractario en el interior del enfriador.



Fig. 2.20 Distribución del refractario en el interior del enfriador de clinker.

3.6 Justificación de la investigación.

El presente trabajo busca obtener una metodología, que permita evaluar las pérdidas de calor en la instalación de piroproceso por convección y radiación en las condiciones actuales del proceso en estudio, proporcionando lo siguiente:

- Estado de los refractarios antes y después de una reparación.

Una vez colocado los refractarios, la medición del campo de temperatura en las superficies del equipamiento facilita la detección de posibles defectos en juntas, incumplimientos de espesores de aislamiento y/o cambio de material refractario, que ponen en riesgo la operación del sistema por caída temprana o daños graves al aislamiento térmico

- Pérdidas de calor anormalmente alto o puntos calientes en la superficie de los equipos.

La detección de valores altos de temperatura en grandes áreas del equipamiento o incluso puntos calientes son indicios de pérdidas de integridad del refractario que pueden acelerar los procesos de corrosión en el material estructural y daños severos asociada a las cargas térmicas que pueden incluso conducir a paradas de la instalación con pérdidas económicas debido a la no producción o al exceso de combustible para poner en funcionamiento la instalación una vez solucionada la avería.

- Conocimiento de las pérdidas económicas asociadas al estado del refractario.

El conocimiento del costo asociadas a la pérdida de una unidad de calor permite tomar decisiones al personal de operación para intervenir el equipo en el momento justo donde continuar la operación significaría un aumento de los costos variables por consumo de combustible sin respaldo productivo.

- Optimización del funcionamiento del horno.

El consumo de calor puede determinarse por medición exclusiva de la potencia calorífica del combustible y de la producción de clinker; sin embargo, el conocimiento de las pérdidas de calor ofrece una información más detallada del proceso, mayor seguridad en los resultados obtenidos y la consistencia de los indicadores de consumo calórico neto medidos con la información de los pfishers. En este sentido, es un método

muy eficaz para la evaluación del rendimiento térmico del proceso, dado que muestra claramente donde se consume calor.

- Reducir la contaminación ambiental

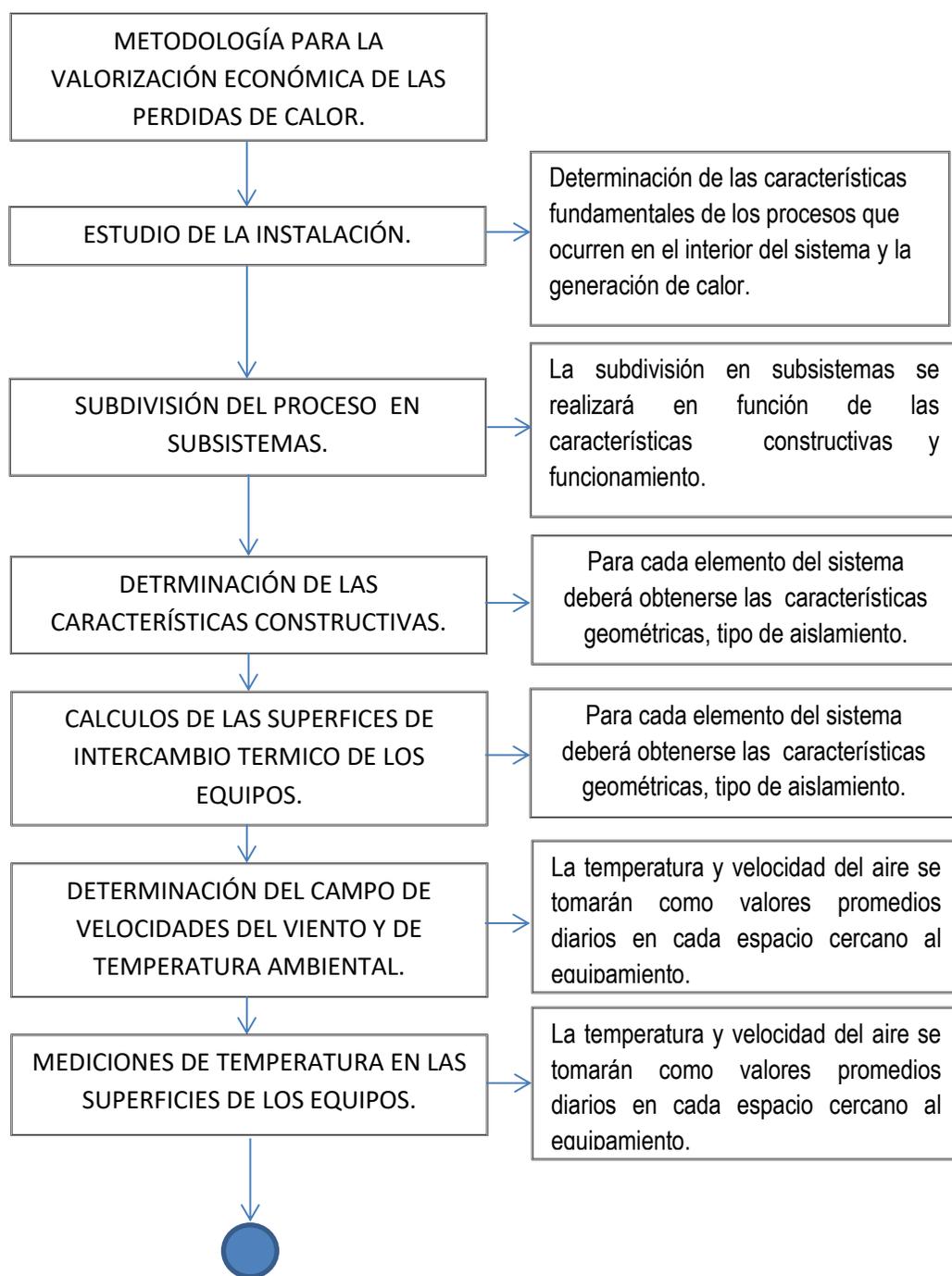
Dado que consumo de energía y contaminación ambiental están unidos, se podría reducir la contaminación si se aplicara la conocida máxima: «La energía que menos contamina es la que no se consume». Las pérdidas de calor implican combustión y generación de gases (CO_x, NO_x y SO_x) sin respaldo productivo. Sin embargo, no parece posible una reducción drástica de las pérdidas de calor, ya que esto implicaría grandes gastos económicos. En este sentido este trabajo hace posible y exigible buscar un compromiso aceptable entre el consumo de energía primaria y las pérdidas de calor en los procesos térmicos alcanzando el equilibrio posible para un «uso racional de la energía».

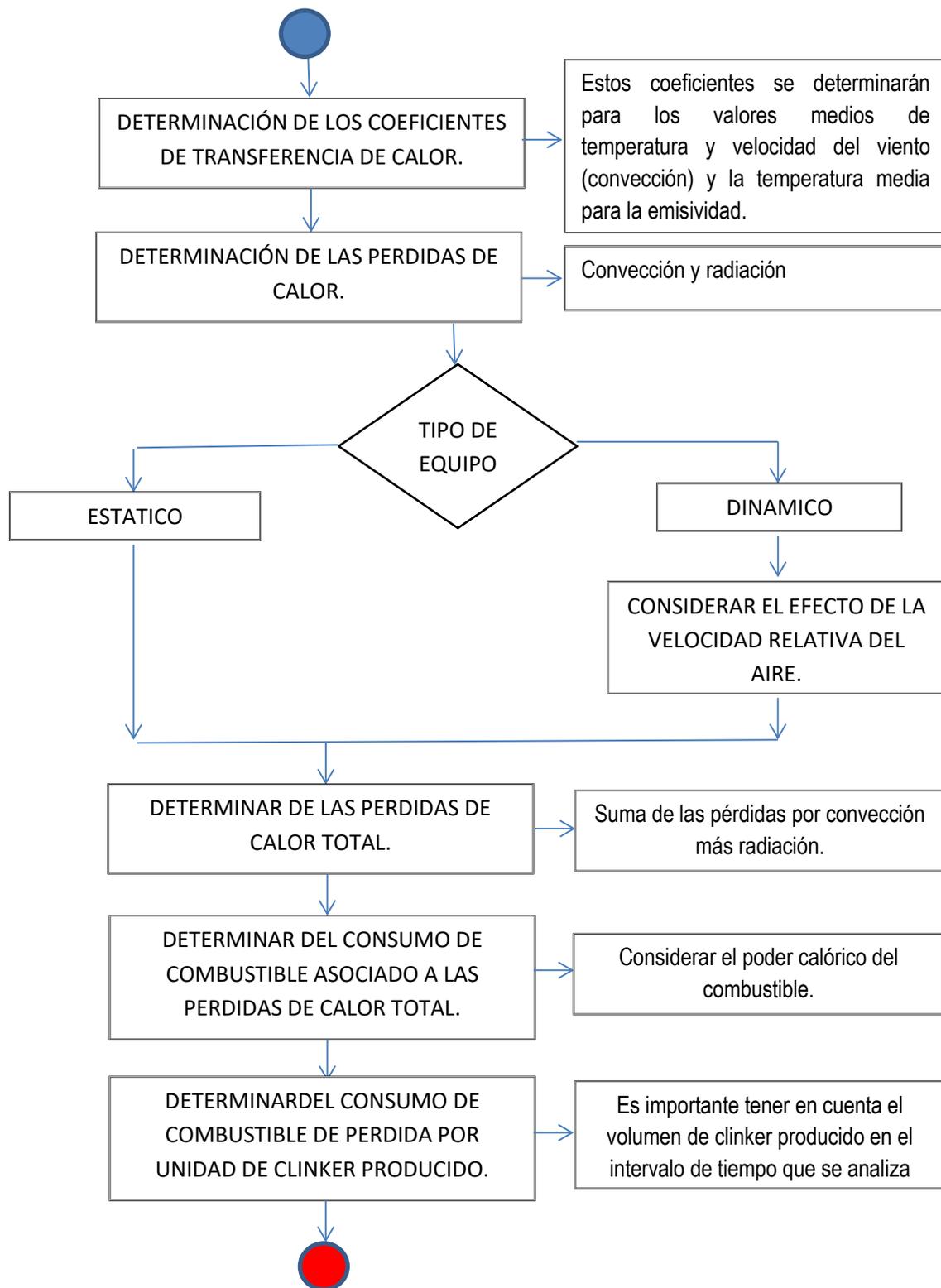
No se trata por tanto de eliminar las pérdidas, sino de minimizarlas, mediante la adopción de técnicas que permitan gastar menos para el mismo fin. Lo anterior supone un análisis muy preciso de todas las secuencias de los procesos, desde el punto de vista energético. Todos los casos de procesos térmicos en espacios cerrados preconizan, como solución fundamental para reducir el consumo, la adopción de sistemas de aislamiento térmico, estudiados adecuadamente en calidad y espesor.

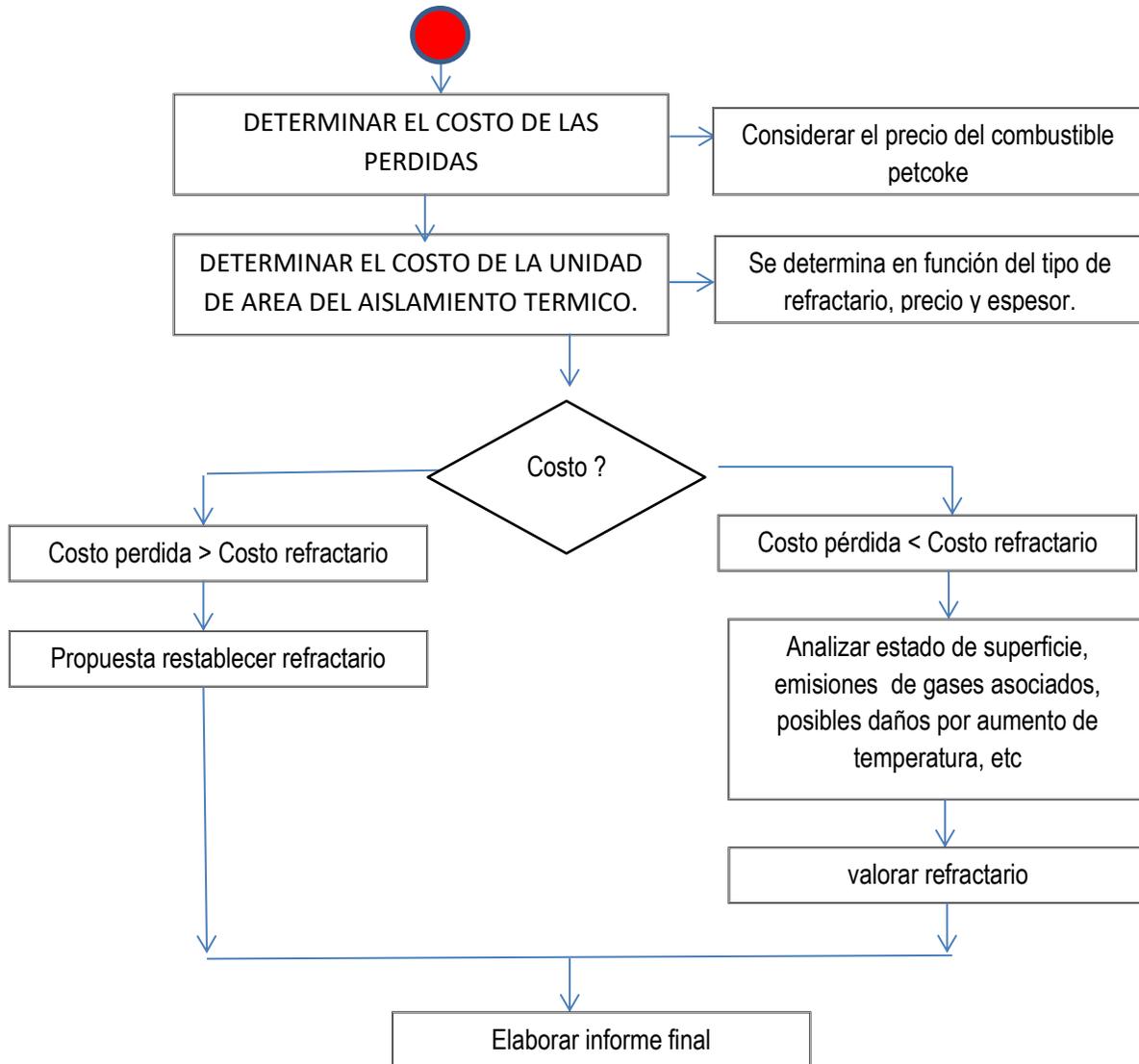
2.7 Metodología.

Para la realización de esta investigación se propone la metodología descrita en el siguiente algoritmo de la figura 2.21

Fig. 2.21 Metodología de la investigación







CAPITULO 3.

CAPITULO III. Aplicación de la metodología y análisis de resultados.

En este capítulo se desarrolla la metodología descrita en el capítulo II epígrafe 2.7. Para facilitar el estudio, el sistema de piroporceso, se divide en sus componentes principales y se determina para cada uno por separado las pérdidas de calor por unidad de producción y sus costos asociados. Las propiedades del aire y los campos de temperatura también son calculados para cada elemento en específico ya que se encuentran a distintos niveles de altitud y las condiciones ambientales son diferentes para la determinación de los coeficientes de trasmisión de calor por convección y radiación.

La toma de datos para la realización de la presente investigación fue realizada según se plantea en el anexo VI. Los cálculos de las áreas de los equipos de piroporceso se realizaron según anexo VII.

3.1 Horno rotatorio.

Para el cálculo de las pérdidas de calor se determinaron las principales variables geométricas del horno, se realizaron mediciones de la temperatura media ambiental y de la superficie del horno, fueron determinadas además la velocidad media del viento, los resultados se muestran en la tabla 3.1.

Tabla 3.1 Condiciones operacionales del horno.

Parámetros geométrico			
Diámetro Interior	m	4.2	
Longitud del horno	m	70	
Condiciones ambientales			
Temperatura media ambiental	°C	27	302K
Velocidad del viento	m/s	1	
Producción del horno			
Clinker	kg/h	116279	

En el interior del horno existen 5 zonas con temperaturas bien definidas asociadas a los procesos químicos que ocurren en su interior según se muestra en la figura 3.1):

1. Área de salida de clinker: esta zona abarca solo 1 m y el refractario empleado es el R2000 (2Wm^{-1}), la temperatura del material es inferior a los $1300\text{ }^{\circ}\text{C}$ y la altura del refractario es de 210mm. La temperatura de la chapa en esta zona tiene un máximo de $360\text{ }^{\circ}\text{C}$ y un mínimo de $270\text{ }^{\circ}\text{C}$
2. Zona de transición baja (metro 2 al metro 10): temperatura de $1300 - 1450\text{ }^{\circ}\text{C}$, con una fuerte influencia de la llama del quemador. El refractario utilizado es el ARKAL R1 con una conductividad de calor de 3 Wm^{-1} . En el momento de realizar este trabajo el espesor del ladrillo refractario era de 200 mm. Esta zona se caracteriza por presentar una pegata de material muy susceptible de descostrar. Las temperaturas de la chapa del horno en esta zona varían entre los $115\text{ }^{\circ}\text{C}$ y los $300\text{ }^{\circ}\text{C}$.
3. Zona de clinkerización (metro 11 al metro 20): como su nombre lo indica es donde se producen las principales reacciones de formación de clinker, su temperatura media está en el orden de los $1450\text{ }^{\circ}\text{C}$, en esta zona también se emplea como refractario el ANCRAL R1 (3Wm^{-1}). Las temperaturas de la chapa del horno en esta zona varían entre los $178\text{ }^{\circ}\text{C}$ y los $320\text{ }^{\circ}\text{C}$ en los puntos calientes.
4. Zona de transición alta (metro 21 al metro 40): se caracteriza por una temperatura de $1300\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $1450\text{ }^{\circ}\text{C}$, se emplea mayoritariamente el ANKRAL R1 aunque existen áreas con REXAL y ALMAG CF (2Wm^{-1}), la altura del refractario también está en el orden de los 200 mm, aunque existen dos puntos calientes en el metro 36 y 37 con alturas de refractario de 95mm y 85 mm
5. Zona de seguridad (metro 41 al metro 62): se caracteriza por temperaturas de $1200 - 1300\text{ }^{\circ}\text{C}$, en esta zona se emplean varios tipos de refractarios ALMAG CF, ANDALUX, RESISTAL SK60 CIS y RESISTAL B6, la temperatura en la superficie del horno oscila entre los $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $320\text{ }^{\circ}\text{C}$ este último valor en los puntos calientes de los metros 43, 45 y 46. El refractario en esta zona presenta pérdidas de espesor
6. Zona de Precalcinación: (metro 62 al metro 69) RESISTAL B65 y ANDALUX, esta zona mantiene una temperatura en la superficie de del horno entre $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $280\text{ }^{\circ}\text{C}$ con un punto caliente con temperatura extrema de $400\text{ }^{\circ}\text{C}$.

forzada en el horno, debido a los ventiladores que enfrían la pared externa del mismo, se modela a través del número de Nusselt promedio sobre un cilindro horizontal representada por la ecuación de Churchill y Bernstein, donde las propiedades del fluido se determinaron a la temperatura de la película T_p :

$$T_p = (T_s + T_\infty) / 2 \quad (18)$$

Dónde:

T_s : Temperatura de la superficie

T_∞ : Temperatura ambiental en un punto alejado de la superficie.
27°C

$$Nu_{cil} = \frac{hD}{k} = 0,3 + \frac{0,62Re^{1/2} \cdot Pr^{1/3}}{[1 + (0,4/Pr)^{2/3}]^{1/4}} \left[1 + \left(\frac{Re}{282000} \right)^{5/8} \right]^{4/5} \quad (19)$$

$$Re = \frac{VD}{\nu} \quad (20)$$

Para el resto de las zonas la transferencia de calor se considera por convección natural sobre una superficie, y se evaluaron por el número de Rayleigh.

$$Ra_D = Gr_D Pr = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)Lc^3}{\nu^2} Pr \quad (21)$$

Como el número de Rayleigh resultó $Ra \leq 10^{12}$, fue calculado en el número de Nusselt a través de la siguiente ecuación:

$$Nu_{cil} = \left\{ 0,6 + \frac{0,387 \cdot Ra_D^{1/6}}{[1 + (0,559/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 \quad (22)$$

Las pérdidas de calor por radiación se determinaron por la ecuación (9) para un coeficiente de radiación $\varepsilon = 0.95$. El área fue determinada utilizando la ecuación de área lateral del cilindro. Los resultados se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 3.2 Resultado de los cálculos de pérdidas de calor en el horno.

Longitud	Superficie	tmax	tmin	tmed	T	Zona de ventiladores	Coefficiente Conv. Nat.	Coefficiente Conv. Forz.	Pérdida Total Convección	Pérdida Total Radiación	Pérdida Total de Calor
m	m ²	°C	°C	°C	°K	m/s			kcal/h	kcal/h	kcal/h
1	12.57	300	270	192	465	8	6.08	7.62	15707	22471	38178
2	13.19	290	170	230	503	1	6.51	8.16	21747	34138	55885
3	13.19	230	160	195	468	1	6.12	7.67	16884	24325	41209
4	13.19	194	150	172	445	1	5.83	7.30	13864	18967	32831
5	13.19	130	115	123	396	1	5.07	6.35	7918	9946	17864
6	13.19	150	115	133	406	1	5.24	6.57	9051	11518	20569
7	13.19	160	120	140	413	8	5.36	6.72	9925	12776	22701
8	13.19	300	140	220	493	1	6.41	8.03	20327	31116	51442
9	13.19	300	200	250	523	8	6.72	8.42	24656	40748	65404
10	13.19	300	250	275	548	1	6.96	8.72	28416	50147	78562
11	13.19	320	240	280	553	1	7.01	8.78	29183	52188	81371
12	13.19	300	220	260	533	8	6.82	8.54	26144	44350	70494
13	13.19	260	200	230	503	1	6.51	8.16	21747	34138	55885
14	13.19	320	230	275	548	8	6.96	8.72	28416	50147	78562
15	13.19	238	178	208	481	1	6.27	7.86	18655	27724	46378
16	13.19	262	210	236	509	1	6.58	8.24	22610	36040	58650
17	13.19	270	230	250	523	1	6.72	8.42	24656	40748	65404
18	13.19	270	240	255	528	1	6.77	8.48	25397	42523	67920
19	13.19	270	250	260	533	8	6.82	8.54	26144	44350	70494
20	13.19	260	240	250	523	1	6.72	8.42	24656	40748	65404
21	13.19	260	230	245	518	1	6.67	8.36	23920	39022	62943
22	13.19	250	220	235	508	1	6.57	8.23	22465	35719	58184
23	13.19	240	210	225	498	1	6.46	8.09	21034	32604	53638
24	13.19	270	200	235	508	1	6.57	8.23	22465	35719	58184
25	13.19	200	140	170	443	8	5.80	7.27	13609	18539	32148
26	13.19	300	100	200	473	1	6.18	7.74	17560	25599	43159
27	13.19	300	200	250	523	1	6.72	8.42	24656	40748	65404
28	13.19	230	190	210	483	1	6.29	7.89	18931	28272	47202
29	13.19	250	190	220	493	1	6.41	8.03	20327	31116	51442
30	13.19	271	196	234	507	8	6.55	8.21	22249	35239	57489
31	13.19	250	200	225	498	1	6.46	8.09	21034	32604	53638
32	13.19	300	230	265	538	8	6.87	8.60	26896	46229	73125
33	13.19	250	150	200	473	1	6.18	7.74	17560	25599	43159
34	13.19	300	215	258	531	1	6.79	8.51	25770	43430	69200
35	13.19	330	230	280	553	1	7.01	8.78	29183	52188	81371
36	13.19	360	290	325	598	1	7.40	9.27	36311	73208	109519
37	13.19	380	350	365	638	1	7.71	9.66	42956	96334	139290
38	13.19	350	330	340	613	1	7.52	9.42	38770	81357	120128
39	13.19	330	300	315	588	1	7.31	9.16	34694	68105	102799
40	13.19	300	250	275	548	8	6.96	8.72	28416	50147	78562
41	13.19	280	250	265	538	1	6.87	8.60	26896	46229	73125
42	13.19	320	300	310	583	1	7.27	9.11	33893	65649	99542
43	13.19	271	256	264	537	1	6.85	8.59	26670	45660	72329
44	13.19	320	300	310	583	1	7.27	9.11	33893	65649	99542
45	13.19	310	270	290	563	1	7.10	8.89	30734	56440	87173
46	13.19	230	180	205	478	1	6.24	7.81	18242	26914	45157
47	13.19	230	200	215	488	1	6.35	7.96	19626	29672	49297
48	13.19	230	200	215	488	1	6.35	7.96	19626	29672	49297
49	13.19	230	200	215	488	1	6.35	7.96	19626	29672	49297
50	13.19	140	120	130	403	1	5.20	6.51	8764	11114	19878
51	13.19	170	140	155	428	1	5.59	7.00	11731	15506	27237
52	13.19	200	200	200	473	1	6.18	7.74	17560	25599	43159
53	13.19	250	180	215	488	1	6.35	7.96	19626	29672	49297
54	13.19	280	250	265	538	1	6.87	8.60	26896	46229	73125
55	13.19	270	250	260	533	1	6.82	8.54	26144	44350	70494
56	13.19	120	100	110	383	1	4.84	6.06	6556	8142	14698
57	13.19	130	105	118	391	1	4.98	6.24	7365	9203	16569
58	13.19	220	150	185	458	1	5.99	7.51	15553	21896	37449
59	13.19	300	283	292	565	1	7.11	8.91	30968	57097	88065
60	13.19	220	150	185	458	1	5.99	7.51	15553	21896	37449
61	13.19	280	180	230	503	1	6.51	8.16	21747	34138	55885
62	13.19	290	260	275	548	1	6.96	8.72	28416	50147	78562
63	13.19	280	260	270	543	1	6.91	8.66	27653	48161	75814
64	13.19	400	250	325	598	1	7.40	9.27	36311	73208	109519
65	13.19	270	250	260	533	1	6.82	8.54	26144	44350	70494
66	13.19	300	150	225	498	1	6.46	8.09	21034	32604	53638
67	13.19	260	170	215	488	1	6.35	7.96	19626	29672	49297
68	13.19	180	130	155	428	1	5.59	7.00	11731	15506	27237
69	13.19	240	220	230	503	1	6.51	8.16	21747	34138	55885
70	13.19	240	200	220	493	1	6.41	8.03	20327	31116	51442
TOTAL	922.68		máxima				TOTAL		1575562	2640182	4215744

Las pérdidas totales de calor están en el orden de las 4215744kcal/h, lo que corresponde a 36kcal/kg de clinker producido. Si tenemos en cuenta que el poder calórico del petcoke es 8004 kcal/kg, se pierden un total de 12,64t petcoke/d, para un precio de 100.00USD/t petcoke, estas pérdidas de calor por convección y radiación en el horno representan un costo de 1264.00USD/d.

3.2 Ducto terciario.

En este caso se dividió el ducto en secciones y se determinaron sus áreas superficiales. Posteriormente se midieron las temperaturas medias en cada sección tal como se muestra en la siguiente figura.

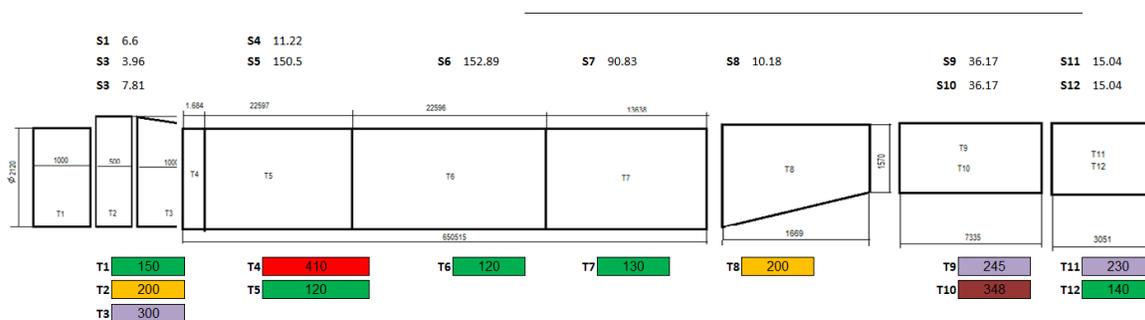


Fig. 3.2 Ducto terciario, áreas de las diferentes zonas y temperaturas medias.

En este caso solo se considera convección natural por lo que fue utilizada la ecuación (12) para la determinación del coeficiente de convección térmica, los coeficientes fueron determinados por las expresiones 13;14;15;16 y 17, finalmente fueron sustituidas en la ecuación 10. En la tabla siguiente se muestran los resultados de los cálculos. Las pérdidas de calor por radiación se determinaron por la ecuación (9) para un coeficiente de radiación $\epsilon = 0.95$. La temperatura ambiental de 27 °C y la velocidad media del aire 1 m/s. Los resultados se muestran en la siguiente tabla.

Las áreas de las zonas cilíndricas fueron determinadas utilizando la ecuación de área lateral del cilindro y para las cónicas la siguiente expresión:

$$A = L_{seccion} \pi (D_{menor} + D_{mayor}) / 2 \quad (23)$$

Tabla 3.3 Resultado de los cálculos de pérdidas de calor por convección y radiación en el terciario.

NOMBRE	Diametro	longitud total	Ducto	Temperatura		Convección		Radiation		Pérdida total de calor	
			Superficie	°C	K	Coef h	Pérdida Qc	coefe	Pérdida Qr	kcal/h	kcal/kg ck
	m	m	m ²								
Union Ducto caperuza del horno	2.12	1	6.60	150.0	423.00	3.27	2697.61	0.95	7386.05	10083.67	0.10
	2.526	0.5	3.96	200.0	473.00	3.40	2359.21	0.95	7744.70	10103.91	0.10
	2.323	1	7.81	300.0	573.00	3.89	8359.62	0.95	36190.77	44550.39	0.43
Ducto	2.12	1.684	11.22	410.0	683.00	4.33	18711.85	0.95	109135.53	127847.39	1.22
	2.12	22.597	150.50	120.0	393.00	3.05	43650.48	0.95	111459.67	155110.15	1.48
	2.12	22.596	152.89	120.0	393.00	3.05	44343.67	0.95	113229.69	157573.36	1.51
	2.12	13.638	90.83	130.0	403.00	3.13	29854.79	0.95	77893.30	107748.09	1.03
Y	1.845	1.669	10.18	200.0	473.00	3.68	6560.37	0.95	19909.37	26469.74	0.25
	1.57	7.335	36.17	245.0	518.00	4.06	32306.06	0.95	107549.06	139855.12	1.34
	1.57	7.335	36.17	348.0	621.00	4.47	52210.61	0.95	236251.08	288461.69	2.76
	1.57	3.051	15.04	230.0	503.00	3.99	12298.36	0.95	39151.12	51449.48	0.49
	1.57	3.051	15.04	140.0	413.00	3.45	5970.73	0.95	14793.18	20763.90	0.20
TOTAL										1140017	11

Las pérdidas totales de calor están en el orden de las 1140017kcal/h, lo que corresponde a 11kcal/kg de clinker producido y a un total de 3.418t petcoke/d, para un precio de 100.00USD/t petcoke, estas pérdidas de calor por convección y radiación en el horno representan un costo de 341.00USD/d.

3.3 Cabezal del horno.

Para el estudio fue dividida en 7 zonas que incluyen: techo, laterales, frentes de cara al horno (sección curva y recta) y frente de cara al quemador (sección curva y recta). Para cada una de estas zonas se determinaron las áreas y se midieron las temperaturas medias tal como se muestra en la figura 3.3.

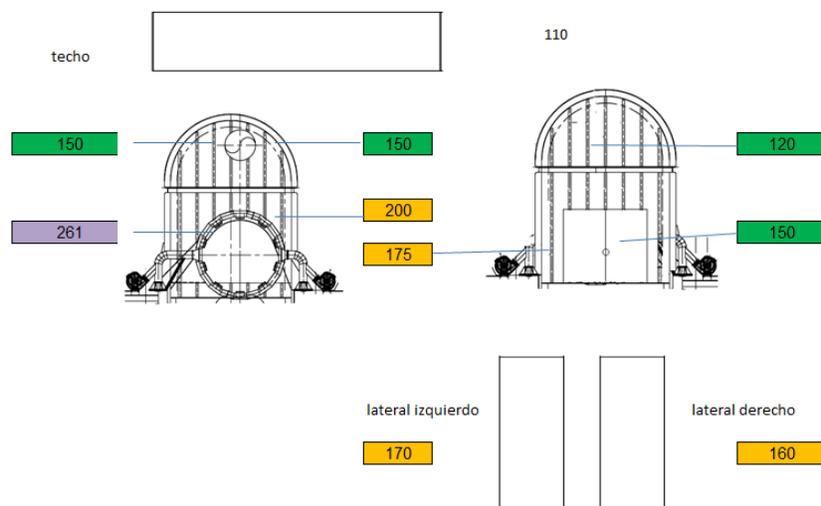


Fig. 3.3 Cabezal del horno. Temperaturas medias de las superficies.

Las pérdidas de calor por radiación se determinaron por la ecuación (9) para un coeficiente de radiación $\varepsilon = 0.95$. En la siguiente tabla se muestran los resultados de las pérdidas de calor. La temperatura media ambiental de 2°C y la velocidad del aire 1m/s

Tabla 3.4 Resultado de los cálculos de pérdidas de calor por convección y radiación en el cabezal del horno

Secciones	ancho	alto	Superficie m ²	Temperatura		Convección		Radiation		Pérdida total de calor	
	m	m		°C	K	Coef h	Pérdida Qc	coef e	Pérdida Qr	kcal/h	kcal/kg ck
seccion 1	8.5	6.3	26.775	150	423.00	2.31	7734	0.95	29963.88	37697.70	0.36
	8.5	6.3	26.775	175	448.00	2.42	9713	1.95	82575.75	92289.14	0.88
seccion 2	8.5	-	28.4	120	393.00	2.16	5815	0.95	21012.56	26827.96	0.26
seccion 3	2	6.3	12.6	170	443.00	3.44	6291	0.95	17897.97	24188.76	0.23
seccion 4	2	6.3	12.6	160	433.00	3.38	5753	0.95	15933.56	21686.80	0.21
seccion 5	8.5	6.3	6.5	200	473.00	2.51	2842	0.95	12634.60	15476.29	0.15
	8.5	6.3	6.5	261	534.00	2.71	4130	1.95	45159.05	49288.75	0.47
	8.5	6.3	7.3	150	423.00	2.31	2097	2.95	25225.88	27322.62	0.26
	8.5	6.3	7.3	150	423.00	2.31	2097	3.95	33777.03	35873.76	0.34
seccion 6	2	-	13.4	231	504.00	3.76	10339	0.95	35072.60	45412.05	0.43
TOTAL							56811		319253	376064	3.59

Las pérdidas totales de calor están en el orden de las 376064kcal/h, lo que corresponde a 4kcal/kg de clinker producido. Si tenemos en cuenta que el poder calórico del petcoke es 8004 kcal/kg, se pierden un total de 11,28t petcoke/d, para un precio de 100.00USD/t petcoke, estas pérdidas de calor por convección y radiación en el horno representan un costo de 128.00USD/d.

3.4 Cámara de humos.

Fue dividida en tres zonas para su estudio: frontal, lateral izquierda y derecha, y se determinaron sus áreas y las temperaturas medias. Para el cálculo del coeficiente de transferencia fue utilizada la expresión del Nu para placa vertical

$$Nu = \left\{ 0,825 + \frac{0,387 \cdot Ra_D^{1/6}}{[1 + (0,492/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 \quad (24)$$

Solo se considera convección natural, la temperatura media del aire es de 27 °C, la velocidad media del aire 1 m/s. en la figura 3.4 se muestran las secciones y sus temperaturas medias

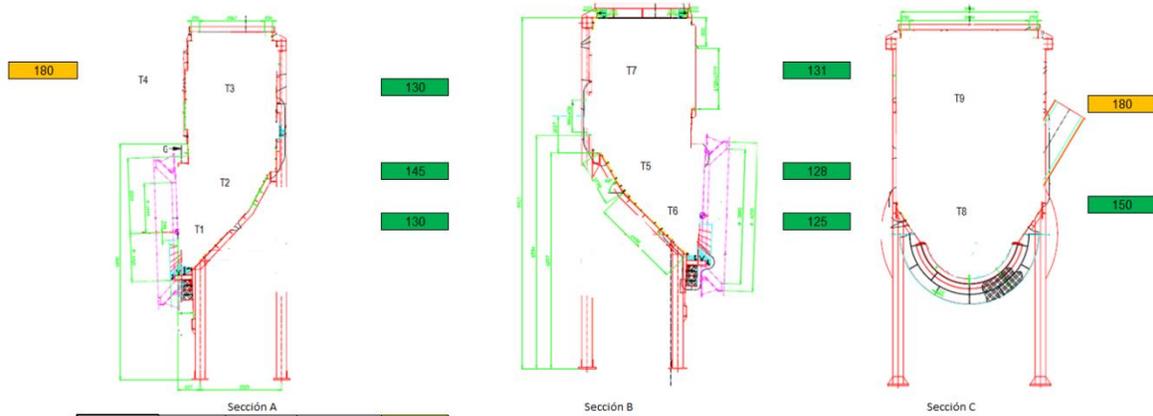


Fig. 3.4 Cámara de humos. Secciones y temperaturas medias

En la tabla siguiente se muestran los resultados de los cálculos.

Tabla 3.5 Resultado de los cálculos de pérdidas de calor por convección y radiación en la cámara de humos

NOMBRE	ancho medio	alto	calcinador 453-PQ1		Convección		Radiación		da total de calor			
			Superficie	Temperatura	Coef h	Pérdida Qc	coefe	Pérdida Qr	kcal/h	kcal/kg ck		
seccion A	seccion A1	2.12	1.956	4.15	130	403.00	5.53	2406.76	0.95	3556.11	5962.88	0.06
	seccion A2	4.15	1.298	5.39	145	418.00	5.78	3734.06	0.95	5656.73	9390.78	0.09
	seccion A3	4.15	3.82	15.85	130	403.00	5.53	9201.11	0.95	13595.10	22796.20	0.22
	seccion A4	4.206	3.138	13.20	180	453.00	6.29	12859.09	0.95	20949.89	33808.98	0.32
seccion C	seccion B1	4.206	4.975	10.46	150	423.00	5.86	7657.19	0.95	11708.49	19365.68	0.19
	seccion B2	2.35	3	7.05	180	453.00	6.29	6868.74	0.95	11190.48	18059.22	0.17
seccion B	seccion C1	2.12	1.956	2.07	125	398.00	5.44	1127.77	0.95	1654.50	2782.28	0.03
	seccion C2	4.15	1.298	6.67	128	401.00	5.49	3771.25	0.95	5555.90	9327.15	0.09
	sección C3	4.15	3.82	15.85	131	404.00	5.54	9317.84	0.95	13788.30	23106.14	0.22
TOTAL											144599	1.38

Las pérdidas totales de calor están en el orden de las 144599kcal/h, lo que corresponde a 1.38kcal/kg de clinker producido. Si tenemos en cuenta que el poder calórico del petcoke es 8004 kcal/kg, se pierden un total de 0.434t petcoke/d, para un precio de 100.00USD/t petcoke, estas pérdidas de calor por convección y radiación en el horno representan un costo de 39.02USD/d.

3.5 Calcinador.

El calcinador es uno de los elementos más importantes del piroproceso, el consumo de combustible alcanza el 66% del total de todo proceso de producción de clinker (44% horno), es el punto para la introducción de combustibles alternativos (lodo petrolizado). La temperatura en su interior alcanza los 1000°C y ocurre la descarbonatación del carbonato de calcio (CaCO₃), la temperatura de la harina alcanza los 900°C.

Las pérdidas de calor ocurren por convección natural y la radiación. En la Figura 3.5 se muestran las zonas de estudio y sus temperaturas medias. La temperatura ambiental 27 °C y velocidad de aire 2m/s.

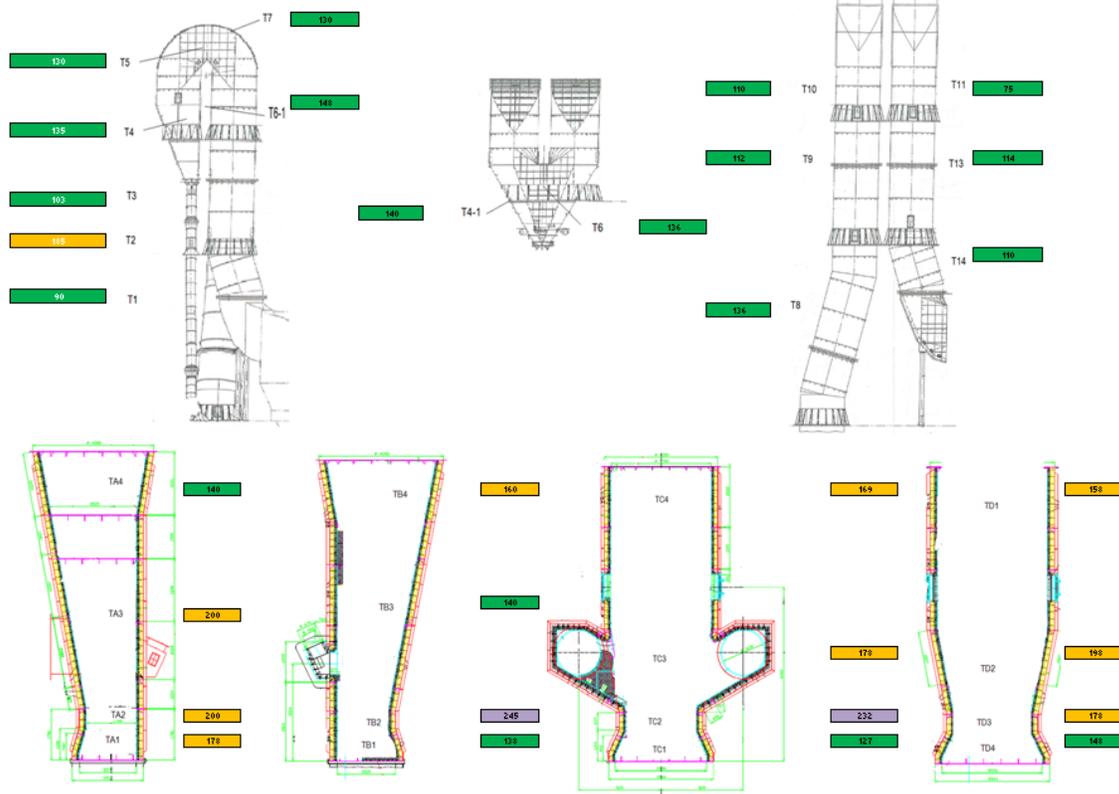


Fig. 3.5 Zonas del calcinador y temperaturas medias.

La superficie exterior se puede tratar como una placa vertical, ya que el diámetro del ducto es suficientemente grande, de modo que los efectos de la curvatura son despreciables. El cálculo del coeficiente de trasmisión fue determinado por la ecuación (24) y sustituido en la ecuación (10) para determinar las pérdidas de calor. Para la determinación de las pérdidas por radiación fue utilizada la ecuación (9) para una emisividad de 0.95.

En la siguiente tabla se muestran los resultados de los cálculos de la perdida de calor total.

Tabla 3.6 Resultado de los cálculos de pérdidas de calor por convección y radiación en el calcinador.

Plano vertical	NOMBRE	ancho medio	alto	calcinador 453-PQ1		Convección		Radiación		Pérdida total de calor		
				Superficie	Temperatura	Coefh	Pérdida Qc	coefe	Pérdida Qr	kcal/h	kcal/kg ck	
				m²	°C	K						
seccion A	seccion A1	2.08	1.108	2.30	178	451.00	4.32	1523.01	0.95	3579.20	5102.21	0.05
	seccion A2	1.766	0.673	1.19	200	473.00	5.06	1052.37	0.95	2324.42	3376.80	0.03
	seccion A3	2.635	6.743	17.77	200	473.00	2.84	8842.78	0.95	34749.09	43591.87	0.42
	seccion A4	3.85	2.221	8.55	140	413.00	3.38	3323.65	0.95	8410.52	11734.17	0.11
seccion B	seccion B1	2.08	1.108	2.30	138	411.00	4.00	1042.77	0.95	2207.02	3249.78	0.03
	seccion B2	1.766	0.673	1.19	245	518.00	5.36	1400.88	0.95	3533.98	4934.86	0.05
	sección B3	2.635	6.743	17.77	140	413.00	2.56	5231.95	0.95	17476.21	22708.16	0.22
	sección B4	3.85	2.221	8.55	160	433.00	3.52	4061.25	0.95	10813.14	14874.39	0.14
seccion C	seccion C1	3.776	1.144	4.32	127	400.00	3.87	1705.97	0.95	3548.89	5254.86	0.05
	seccion C2	3.608	0.637	2.30	232	505.00	5.35	2545.10	0.95	6091.94	8637.04	0.08
	seccion C3	3.944	3.053	12.04	178	451.00	3.35	6176.14	0.95	18700.19	24876.32	0.24
	sección C4	4.28	5.916	25.32	169	442.00	2.80	10204.43	0.95	35560.08	45764.50	0.44
seccion D	seccion D1	3.776	1.144	4.32	148	421.00	4.06	2155.78	0.95	4713.77	6869.55	0.07
	seccion D2	3.608	0.637	2.30	178	451.00	4.96	1744.24	0.95	3569.34	5313.58	0.05
	seccion D3	3.944	3.053	12.04	198	471.00	3.46	7201.29	0.95	23079.26	30280.55	0.29
	seccion D4	4.28	5.916	32.06	158	431.00	2.74	11698.81	0.95	39583.05	51281.86	0.49
											287850	3

Tubería vertical	NOMBRE	diametro	largo	calcinador 453-PQ1		Convección		Radiación		Pérdida total de calor		
				Superficie	Temperatura	Coefh	Pérdida Qc	coefe	Pérdida Qr	kcal/h	kcal/kg ck	
				m²	°C	K						
Cuello de ganso	Ducto entr	4.296	28.4	14.48	130	403.00	1.75	2656.42	0.95	12417.65	15074.07	0.14
	Ducto sal	4.296	28.4	14.48	130	403.00	1.75	2656.42	0.95	12417.65	15074.07	0.14
											30148	0.29

Plano vertical	NOMBRE	diametro	largo	calcinador 453-PQ1		Convección		Radiación		Pérdida total de calor			
				Superficie	Temperatura	Coefh	Pérdida Qc	coefe	Pérdida Qr	kcal/h	kcal/kg ck		
				m²	°C	K							
Tolva	Frente	5.196	8.914	46.32	136	409.00	2.37	12168.80	0.95	43170.76	55339.56	0.53	
	Lat Derecho	2.493	8.14	20.29	135	408.00	2.42	5392.65	0.95	18657.86	24050.51	0.23	
	Lat izquierdo	2.493	8.914	22.22	140	413.00	2.39	6102.67	0.95	21857.90	27960.57	0.27	
	Fondo	5.196	7.367	38.28	148	421.00	2.55	11991.93	0.95	41770.56	53762.49	0.51	
											TOTAL	797110	7.62

Tubería vertical	NOMBRE	Tipo	longitud total	Ducto	calcinador material		Convección		Radiación		Pérdida total de calor		
					Superficie	Temperatura	Coefh	Pérdida Qc	coefe	Pérdida Qr	kcal/h	kcal/kg ck	
					m²	°C	K						
Ducto salida material	seccion 1	0.881	1.785	9.88	103	376.00	3.87	2978.78	0.95	5545.46	8524.24	0.08	
	seccion 2	0.881	2.734	15.13	185	458.00	4.63	11200.33	0.95	25348.99	36549.32	0.35	
	seccion 3	0.881	3.818	21.13	90	363.00	3.69	5072.94	0.95	9289.24	14362.18	0.14	
											TOTAL	59436	0.568

Tubería vertical	NOMBRE	Tipo	longitud total	Ducto	calcinador gases		Convección		Radiation		Pérdida total de calor		
					Superficie	Temperatura	Coefh	Pérdida Qc	coefe	Pérdida Qr	kcal/h	kcal/kg ck	
					m²	°C	K						
Ducto entrada gases	seccion 1	4.286	10.899	293.51	185	458.00	2.92	136973.84	0.95	491614.98	628588.83	6.01	
	seccion 2	4.286	16.021	431.44	90	363.00	2.33	65302.88	0.95	189631.38	254934.26	2.44	
											TOTAL	883523	8.44

Las pérdidas totales de calor están en el orden de las 2058068kcal/h, lo que corresponde a 20kcal/kg de clinker producido. Si tenemos en cuenta que el poder calórico del petcoke es 8004 kcal/kg, se pierden un total de 6.171t petcoke/d, para un precio de 100.00USD/t petcoke, estas pérdidas de calor por convección y radiación en el horno representan un costo de 617.00USD/d

3.6 Ciclones.

Para el estudio de las pérdidas se realiza el cálculo para cada ciclón por separado, determinándose para cada uno las superficies de transferencia y sus temperaturas medias. Para la parte cilíndrica y cónica, la superficie exterior se puede tratar como una placa vertical, ya que los diámetros son suficientemente grande, de modo que los efectos de la curvatura sean despreciables. Esta condición tiene que ser comprobada y satisfecha por la condición

Luego, el Número se Nusselt fue calculado para todos los casos por la ecuación (24). La temperatura media ambiental de 27°C y la velocidad del viento de 3m/s. en la siguiente figura se muestran los valores de temperatura media de las superficies de los ciclones.

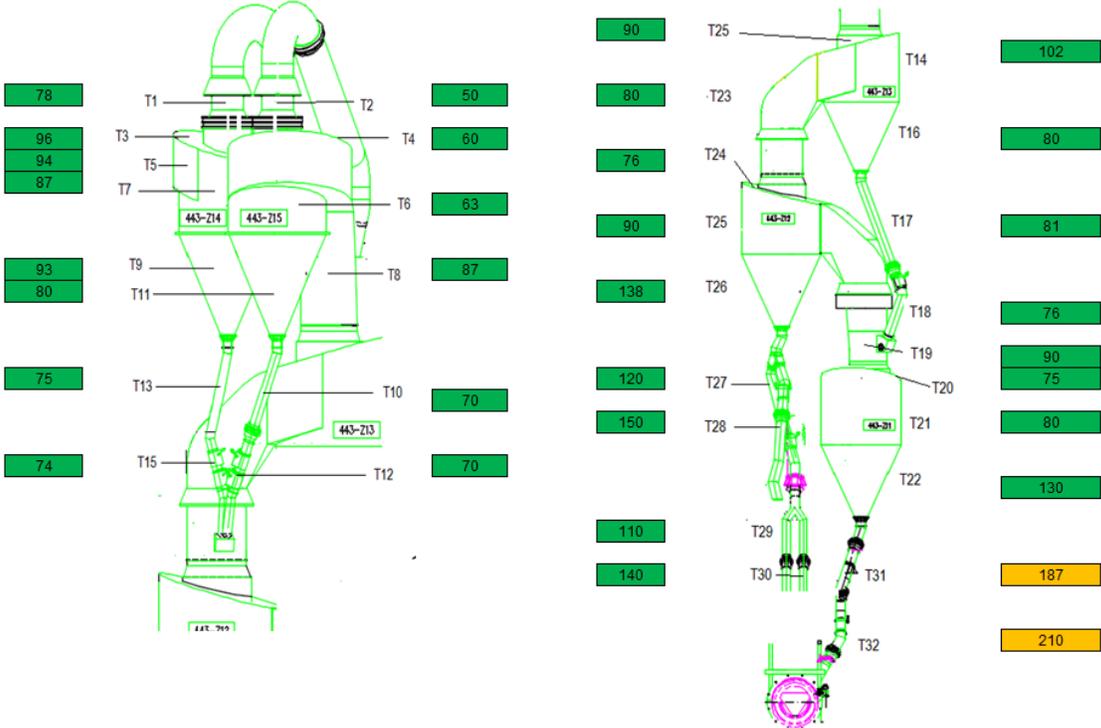


Fig. 3.6 Temperaturas medias de las superficies de los ciclones.

En la tabla 3.7 se muestra los resultados de los cálculos de las áreas de los ciclones y en la 3.8 los resultados de las pérdidas de calor.

Tabla 3.7 Resultado del cálculo de las áreas de transferencia de los ciclones

diametro cilindro ext	7.38	m
diametro cilindro int	6.88	m
altura mayor	7.112	m
altura menor	5.08	m
altura media	6.096	m
Area lateral cilindro	141	m ²
Area lateral cono	92.45	m ²
diametro cono int sal	0.9	m
diametro cono ext sal	1.44	m
diametro cono int ent	6.88	m
diametro cono ext ent	7.38	m
altura cono	6.5	m
Generatriz	7.112	m
AREA TOTAL	234	m ²
Area entrada gases	10.34	
Area salida gases	11.64	m ²
Area salida material	0.63	

443-Z11

diametro cilindro ext	7	m
diametro cilindro int	6.62	m
altura mayor	4.3	m
altura menor	5.08	m
altura media	4.69	m
Area lateral cilindro	103	m ²
Area lateral cono	84.01	m ²
diametro cono int sal	0.8	m
diametro cono ext sal	1.34	m
diametro cono int ent	6.62	m
diametro cono ext ent	7	m
altura cono	6.246	m
Generatriz	6.86	m
AREA TOTAL	187	m ²
Area entrada gases	11	
Area salida gases	10.4	m ²
Area salida material	0.5	

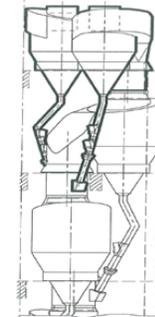
443-Z13

diametro cilindro ext	7	m
diametro cilindro int	6.62	m
altura mayor	4.3	m
altura menor	5.08	m
altura media	4.69	m
Area lateral cilindro	103	m ²
Area lateral cono	84.01	m ²
diametro cono int sal	0.8	m
diametro cono ext sal	1.34	m
diametro cono int ent	6.62	m
diametro cono ext ent	7	m
altura cono	6.246	m
Generatriz	6.86	m
AREA TOTAL	187	m ²
Area entrada gases	11	
Area salida gases	10.4	m ²
Area salida material	0.5	

443-Z12

diametro cilindro ext	6.34	m
diametro cilindro int	6.04	m
altura mayor	5.22	m
altura menor	3.89	m
altura media	4.555	m
Area lateral cilindro	91	m ²
Area lateral cono	69.24	m ²
diametro cono int sal	0.6	m
diametro cono ext ent	1.06	m
diametro cono int ent	6.04	m
diametro cono ext ent	6.34	m
altura cono	5.842	m
Generatriz	6.355	m
AREA TOTAL	160	m ²
Area entrada gases	3.77	
Area salida gases	6.87	m ²
Area salida material	0.28	

443-Z14



diametro cilindro ext	6.34	m
diametro cilindro int	6.04	m
altura mayor	5.22	m
altura menor	3.89	m
altura media	4.555	m
Area lateral cilindro	91	m ²
Area lateral cono	69.24	m ²
diametro cono int sal	0.6	m
diametro cono ext ent	1.06	m
diametro cono int ent	6.04	m
diametro cono ext ent	6.34	m
altura cono	5.842	m
Generatriz	6.355	m
AREA TOTAL	160	m ²
Area entrada gases	3.77	m ²
Area salida gases	6.87	
Area salida material	0.28	

443-Z15

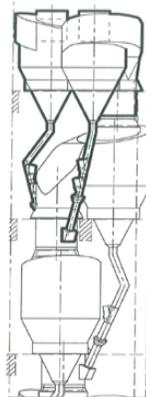


Tabla 3.8. Resultado de los cálculos de pérdidas de calor por convección y radiación en los ciclones.

NOMBRE	Diametro m	altura media m	ciclón	443-Z11	etapa	C4	Convección		Radiación		Pérdida total de calor	
			Superficie m ²	Temperatura °C	K	Coef h	Pérdida Qc	coef e	Pérdida Qr	kcal/h	kcal/kg ck	
Cono	4.193	6.5	92.45	130	403.00	5.53	53659.98	0.95	79285.28	132945.25	1.27	
Cilindro	7.38	6.096	141.34	80	353.00	4.47	34712.07	0.95	50088.40	84800.47	0.81	
Techo	7.6	-	30.00	75	348.00	4.33	6490.80	0.95	9433.53	15924.33	0.15	
TOTAL										233670	2.23	

NOMBRE	Tipo	longitud total m	Ducto	material	etapa	C4	Convección		Radiation		Pérdida total de calor	
	Diametro m		Superficie m ²	Temperatura °C	K	Coef h	Pérdida Qc	coef e	Pérdida Qr	kcal/h	kcal/kg ck	
Ducto salida	0.88	6.36	35.26	222	495.00	6.80	47260.40	0.95	85289.44	132549.84	1.27	
	0.88	8.81	48.82	223	496.00	6.81	65869.86	0.95	119177.30	185047.16	1.77	
TOTAL										185047	1.77	

NOMBRE	Diametro m	longitud total m	Ducto	gases	etapa	C4	Convección		Radiación		Pérdida total de calor	
			Superficie m ²	Temperatura °C	K	Coef h	Pérdida Qc	coef e	Pérdida Qr	kcal/h	kcal/kg ck	
Ducto entrada	4.296	20.5	579.89	110	383.00	5.16	254107.76	0.95	366614.15	620721.91	5.93	
TOTAL										620722	5.93	

NOMBRE	Diametro m	altura media m	ciclón	443-Z12	etapa	C3	Convección		Radiación		Pérdida total de calor	
			Superficie m ²	Temperatura °C	K	Coef h	Pérdida Qc	coef e	Pérdida Qr	kcal/h	kcal/kg ck	
Cono	4.173	6.246	84.01	138	411.00	5.66	53760.05	0.95	80449.06	134209.11	1.28	
Cilindro	7	4.69	103.14	90	363.00	4.72	31633.15	0.95	45332.46	76965.62	0.74	
Techo	7.24	-	36.00	75	348.00	4.36	7996.83	0.95	11602.91	19599.74	0.19	
TOTAL										230774	2.21	

NOMBRE	Diametro m	longitud total m	Ducto	C3		Convección		Radiation		Pérdida total de calor	
			Superficie m ²	Temperatura °C	K	Coef h	Pérdida Qc	coef e	Pérdida Qr	kcal/h	kcal/kg ck
Ducto salida	0.88	16.26	45.05	120	393.00	5.35	22889.25	0.95	33365.18	56254.44	0.54
	0.68	7.69	16.48	110	383.00	5.16	7220.90	0.95	10417.96	17638.85	0.17
	0.68	7.69	16.48	140	413.00	5.70	10794.24	0.95	16208.05	27002.29	0.26
	0.68	14.43	30.92	150	423.00	5.86	22627.57	0.95	34599.45	57227.01	0.55
TOTAL										56254	0.54

NOMBRE	Diametro m	longitud total m	Ducto	gases	etapa	C3	Convección		Radiación		Pérdida total de calor	
			Superficie m ²	Temperatura °C	K	Coef h	Pérdida Qc	coef e	Pérdida Qr	kcal/h	kcal/kg ck	
Ducto entrada	3.85	7.08	170.00	90	363.00	4.72	52139.95	0.95	74720.10	126860.06	1.21	
TOTAL										126860	1.21	

Jose Luis Romero
Cabrera:
superficie total menos el
área del ducto de salida

Tabla 3.8. Resultado de los cálculos de pérdidas de calor por convección y radiación en los ciclones. Cont...

NOMBRE	Diametro	altura media	ciclon	443-Z13	etapa	C2						
			Superficie	Temperatura	Convección		Radiación		Pérdida total de calor			
	m	m	m ²	°C	K	Coef h	Pérdida Qc	coef e	Pérdida Qr	kcal/h	kcal/kg ck	
Cono	4.173	6.246	84.01	80	353.00	4.47	20632.30	0.95	29771.75	50404.05	0.48	
Cilindro	7.00	4.69	103.14	102	375.00	4.99	39627.84	0.95	56871.70	96499.54	0.92	
Techo	7.24	-	36.00	90	363.00	4.72	11041.40	0.95	15823.08	26864.48	0.26	
TOTAL										173768	1.66	

NOMBRE	Diametro	longitud total	Ducto	material	etapa	C3						
			Superficie	Temperatura	Convección		Radiation		Pérdida total de calor			
	m	m	m ²	°C	K	Coef h	Pérdida Qc	coef e	Pérdida Qr	kcal/h	kcal/kg ck	
Ducto salida	0.882	11.015	30.52	81	354.00	4.49	7677.86	0.95	11066.68	18744.53	0.18	
	0.882	4.363	12.09	76	349.00	4.36	2685.46	0.95	3896.44	6581.90	0.06	
TOTAL										6582	0.24	

NOMBRE	Diametro	longitud total	Ducto	gases	etapa	C3						
			Superficie	Temperatura	Convección		Radiación		Pérdida total de calor			
	m	m	m ²	°C	K	Coef h	Pérdida Qc	coef e	Pérdida Qr	kcal/h	kcal/kg ck	
Ducto entrada	3.85	4.383	160.00	80	353.00	4.47	39296.09	0.95	56702.98	95999.07	0.92	
TOTAL										95999	0.92	

NOMBRE	Diametro	altura media	ciclon	443-Z14	etapa	C1-1						
			Superficie	Temperatura	Convección		Radiación		Pérdida total de calor			
	m	m	m ²	°C	K	Coef h	Pérdida Qc	coef e	Pérdida Qr	kcal/h	kcal/kg ck	
Cono	3.7	5.842	69.24	93	366.00	4.79	22550.62	0.95	32300.58	54851.20	0.52	
Cilindro	6.34	4.555	90.73	87	360.00	4.65	26130.96	0.95	37491.00	63621.97	0.61	
Techo	7.446	-	36.00	96	369.00	4.86	12417.18	0.95	17787.83	30205.01	0.29	
TOTAL										148678	1.42	

NOMBRE	Diametro	longitud total	Ducto	material	etapa	C3						
			Superficie	Temperatura	Convección		Radiation		Pérdida total de calor			
	m	m	m ²	°C	K	Coef h	Pérdida Qc	coef e	Pérdida Qr	kcal/h	kcal/kg ck	
Ducto salida	1	5.047	15.86	75	348.00	4.33	3430.52	0.95	4985.81	8416.34	0.08	
	1	6.58	20.67	74	347.00	4.30	4353.95	0.95	6339.30	10693.26	0.10	
TOTAL										8416	0.08	

NOMBRE	Diametro	longitud total	Ducto	gases	etapa	C3						
			Superficie	Temperatura	Convección		Radiación		Pérdida total de calor			
	m	m	m ²	°C	K	Coef h	Pérdida Qc	coef e	Pérdida Qr	kcal/h	kcal/kg ck	
Ducto entrada	3.62	4.832	48.00	78	351.00	4.41	11222.13	0.95	16234.14	27456.27	0.26	
TOTAL										27456	0.26	

NOMBRE	Diametro	altura media	ciclon	443-Z15	etapa	C1-2						
			Superficie	Temperatura	Convección		Radiación		Pérdida total de calor			
	m	m	m ²	°C	K	Coef h	Pérdida Qc	coef e	Pérdida Qr	kcal/h	kcal/kg ck	
Cono	3.7	5.842	69.24	80	353.00	4.47	17006.07	0.95	24539.21	41545.28	0.40	
Cilindro	6.34	4.555	90.73	63	336.00	3.95	13626.57	0.95	20446.91	34073.48	0.33	
Techo	7.446	-	36.00	60	333.00	3.85	4846.85	0.95	7363.50	12210.35	0.12	
TOTAL										87829	0.84	

NOMBRE	Diametro	longitud total	Ducto	material	etapa	C1-2						
			Superficie	Temperatura	Convección		Radiation		Pérdida total de calor			
	m	m	m ²	°C	K	Coef h	Pérdida Qc	coef e	Pérdida Qr	kcal/h	kcal/kg ck	
Ducto salida	1	8.771	27.55	70	343.00	4.18	5182.25	0.95	7610.48	12792.73	0.12	
	1	2.33	7.32	70	343.00	4.18	1376.66	0.95	2021.71	3398.37	0.03	
TOTAL										3398	0.03	

NOMBRE	Diametro	longitud total	Ducto	entrada	etapa	C1-2						
			Superficie	Temperatura	Convección		Radiación		Pérdida total de calor			
	m	M	m ²	°C	K	Coef h	Pérdida Qc	coef e	Pérdida Qr	kcal/h	kcal/kg ck	
Ducto gases	3.62	4.832	48.00	50	323	3.44	4130.94	0.95	6674.99	10805.93	0.10	
TOTAL										10806	0.10	

Las pérdidas totales de calor están en el orden de las 2016261kcal/h, lo que corresponde a 19kcal/kg de clinker producido. Si tenemos en cuenta que el poder calórico del petcoke es 8004 kcal/kg, se pierden un total de 6.046t petcoke/d, para un precio de 100.00USD/t petcoke, estas pérdidas de calor por convección y radiación en el horno representan un costo de 604.00USD/d

3.7 Análisis de resultados.

En la siguiente tabla se resumen los resultados de los cálculos de pérdidas de calor en la instalación de piroproceso.

Tabla 3.9 Comparativo de las pérdidas entre los equipos de piroproceso.

Equipo	Pérdidas				
	kcal/h	kcal / kgck	kg pet / kgck	kg pet / d	USD/d
Horno	4215744	36.3	0.0045	12641	1137.68
Terciario	1140017	11	0.0014	3418	307.65
Caperuza	376064	4	0.0004	1128	101.49
Cámara de humos	144599	1.38	0.0002	434	39.02
Calcinador	2058068	20	0.0025	6171	555.40
Ciclones	2016261	19	0.0024	6046	544.12

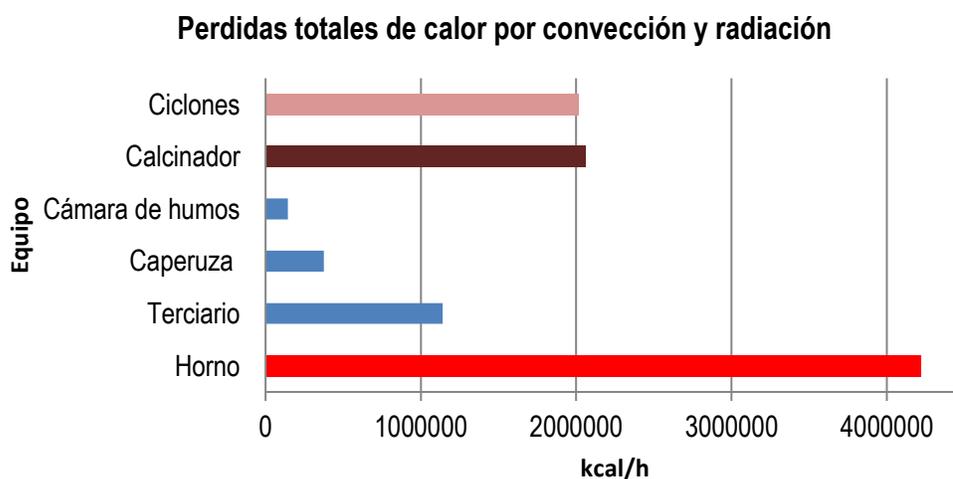


Fig. 3.7 Pérdidas totales de calor por convección y radiación en la instalación de piroproceso

En el gráfico se muestra que las mayores pérdidas de calor por convección y radiación ocurren en el horno rotatorio que representa el 42% del total del proceso y el 96.6% del total de las pérdidas de los ciclones y el calcinador, esto se debe en primer lugar al intenso intercambio que se produce en las zonas de los ventiladores de pegatas debido a que los valores del coeficiente de convección forzada supera el natural en 1.25 veces, y en segundo lugar al intenso campo de temperatura en la superficie del horno más que el resto de los equipos, con una temperatura media máxima que supera los 261.5 °C y con una superficie mayor de 270 m² por encima de los 300 °C debido al estado actual del refractario con pérdidas de espesor promedio del 22%.

Por su parte las pérdidas en el calcinador y los ciclones son similares a pesar de que este último supera en 2.12 veces la superficie del calcinador, esto se debe a que en el calcinador se consume el 66% del combustible total del proceso incluso superior al del horno (40%), por lo que la potencia térmica de los gases es muy elevada en comparación con esos mismos gases al pasar por los ciclones. En ambos casos los refractarios son similares en tipo y disposición.

En el gráfico de la figura 3.8, se muestra la dependencia de los costos de las pérdidas de calor por m² en función de la temperatura de la superficie del horno. La línea roja representa el costo promedio del m² de refractario utilizado en el horno, lo que nos muestra es que a partir de los 295°C los costos de las pérdidas de calor por convección y radiación superan los asociados al cambio de refractario y cada 50°C que logremos disminuir representa un ahorro de 25.00USD por m². Para el calcinador por encima de los 247 °C el costo de las pérdidas superan los asociados al cambio del m² de refractario.

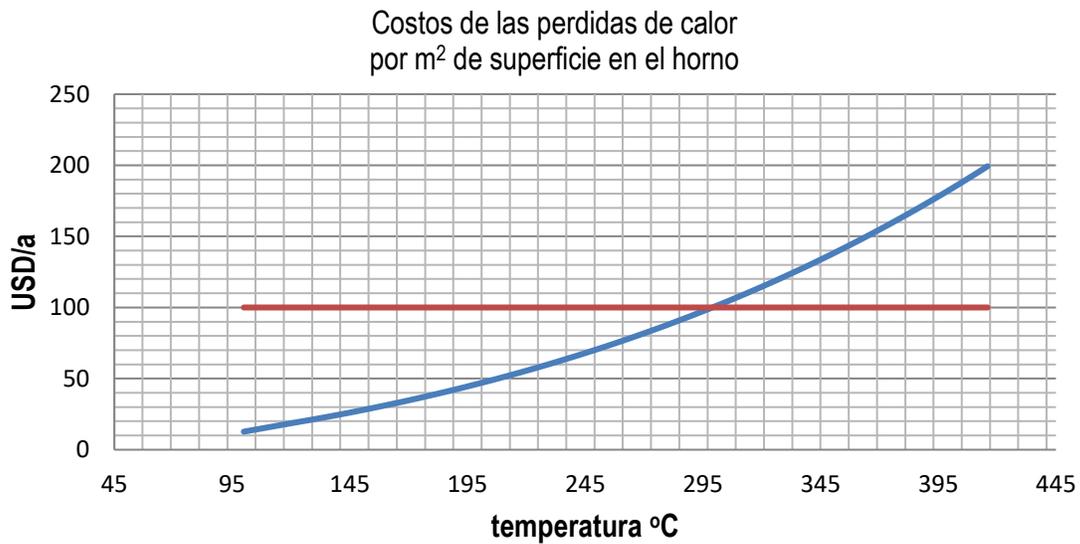


Fig. 3.8 Costos de las pérdidas de calor de un m² de refractario del horno en función de la temperatura de la superficie.

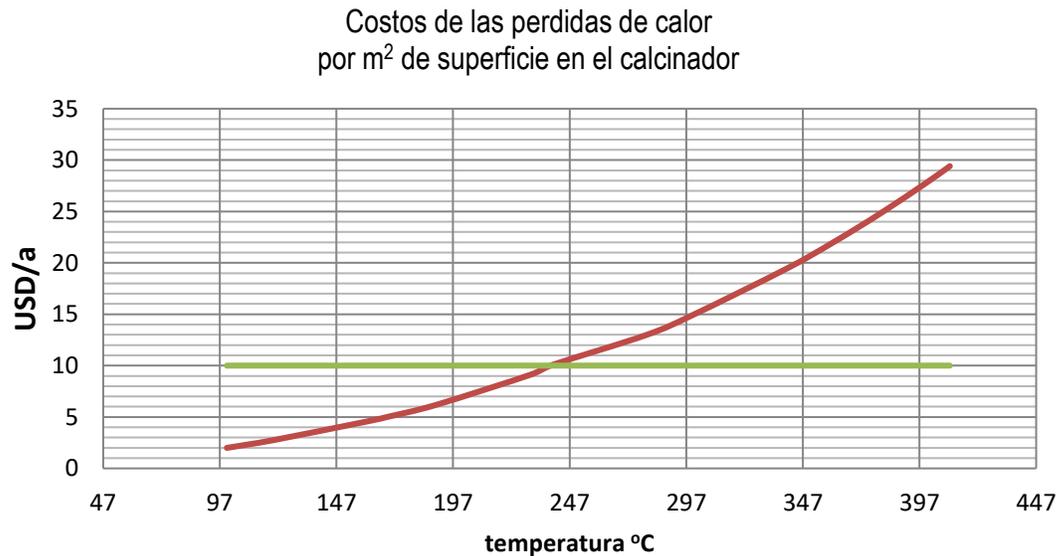


Fig. 3.9 Costos de las pérdidas de calor de un m² de refractario del calcinador en función de la temperatura de la superficie.

Si las temperaturas de las superficies del horno no superaran los 150 °C (establecidos por proyecto), las pérdidas de calor estarían en el orden de las 1796700kcal/h lo que se

ahorrarían 3149818kcal/h con respecto a la situación actual esto implica un total de 9.44t petcoke/d /944.00USD/d.

En el caso del calcinador si las temperaturas de las superficies del calcinador no superaran los 120°C (establecidos por proyecto), las pérdidas de calor estarían en el orden de las 1433831kcal/h lo que se ahorrarían 690662kcal/h con respecto a la situación actual esto implica un total de 2.07t petcoke/d/207.00USD/d.

Para los ciclones mantener una temperaturas de las superficies inferior a los 85 °C (establecidos por proyecto), las pérdidas de calor estarían en el orden de las 1436066kcal/h lo que se ahorrarían 580195kcal/h con respecto a la situación actual esto implica un total de 1.8t petcoke/d /180.00USD/d.

Adicionalmente el ahorro en el consumo de petcoke implica una sensible disminución de las emisiones de gases de combustión específicamente gases de efecto invernadero y lluvia acida. Por cada tonelada de petcoke dejada de combustionar se dejan de emitir en kg/d:
CO₂ 3.14E03 t; CH₄ 2.00E-01; N₂O 1.00E-01; NO_x 4.20E01; CO 3.60E01.

Aplicado a los acaso anteriores:

Horno: CO₂: 2.96E04; CH₄:1.89; N₂O: 9.44E-01; NO_x:3.96E02; CO: 3.40E02

Calcinador: CO₂: 6.50E03; CH₄:4.14E-01; N₂O: 2.07E-01; NO_x:8.69E01; CO: 7.45E01

Ciclones: CO₂: 5.65E03; CH₄:3.60E-01; N₂O: 1.80E-01; NO_x:7.56E01; CO: 6.48E01

CONCLUSIONES.

CONCLUSIONES.

1. La producción de cemento es un proceso de alta carga calórica, representando un sector de alto consumo en la industria, así como también representa un gran impacto ambiental ya que por cada tonelada de clinker producido una cantidad equivalente al doble de gases son emitidos a la atmosfera. Los procesos de transferencia de calor por convección y radiación constituye la principal fuente de pérdidas de calor de naturaleza compleja ya que depende de muchos factores y se hace difícil de atenuar o eliminar.
2. Los equipos que componen la instalación de piroproceso presentan complejas geometrías y grandes superficies de transferencia de calor con el exterior, además de manejar elevadas cargas térmicas que maximizan las perdidas debido a procesos de transferencia de calor por convección y radiación que elevan los costos asociados a la instalación de refractarios.
3. Las mediciones del campo de temperatura de las superficies de los equipos de piroproceso fueron realizadas con cámaras termografías de alta definición, que garantizan el registro de las temperaturas, máxima, mínima y media utilizadas en los cálculo, minimizando los posibles errores durante las mediciones, por lo que los resultados muy confiables.
4. En el horno rotatorio, las pérdidas totales de calor están en el orden de las 4215744kcal/h, que representa el 42% del total del proceso y el 96.6% del total de las pérdidas de los ciclones y el calcinador, esto se debe al intenso intercambio que se produce en las zonas de los ventiladores de pegatas debido la convección forzada y al elevado campo de temperatura en la superficie, con una superficie mayor de 270m² por encima de los 300°C por el deterioro del refractario.
5. Los costos de las pérdidas de calor en el horno muestran que una temperatura por encima de 295°C se supera los costos asociados al cambio de refractario por lo que puede ser tomado como referencia para su ejecución. En el caso del calcinador y los ciclones este valor umbral está en el orden de los 250 °C.

RECOMENDACIONES.

RECOMENDACIONES

La cantidad de calor que egresa del sistema como calor de radiación y convección es alta en el pre-calentador (si se compara con las pérdidas típicas de calor mencionadas con anterioridad en la descripción de las corrientes de energía si los equipos deberían perder en radiación y convección cerca de 25 kcal/h frente a pérdidas de 40 ó 47 kcal/h); existe la posibilidad de que esté desgastado el material del equipo y por lo tanto se recomienda hacer alguna inspección a este.

Realizar un estudio similar para el enfriador de clinker ya que por el tiempo destinado a este trabajo no fue posible incluirlo en el alcance a pesar de estar propuesto dentro de los equipos a analizar.

Incluirlo la presente metodología dentro del paquete de documentos técnicos de la gerencia de Planta para ser utilizado cuando se realicen los análisis de los refractarios.

BIBLIOGRAFÍA.

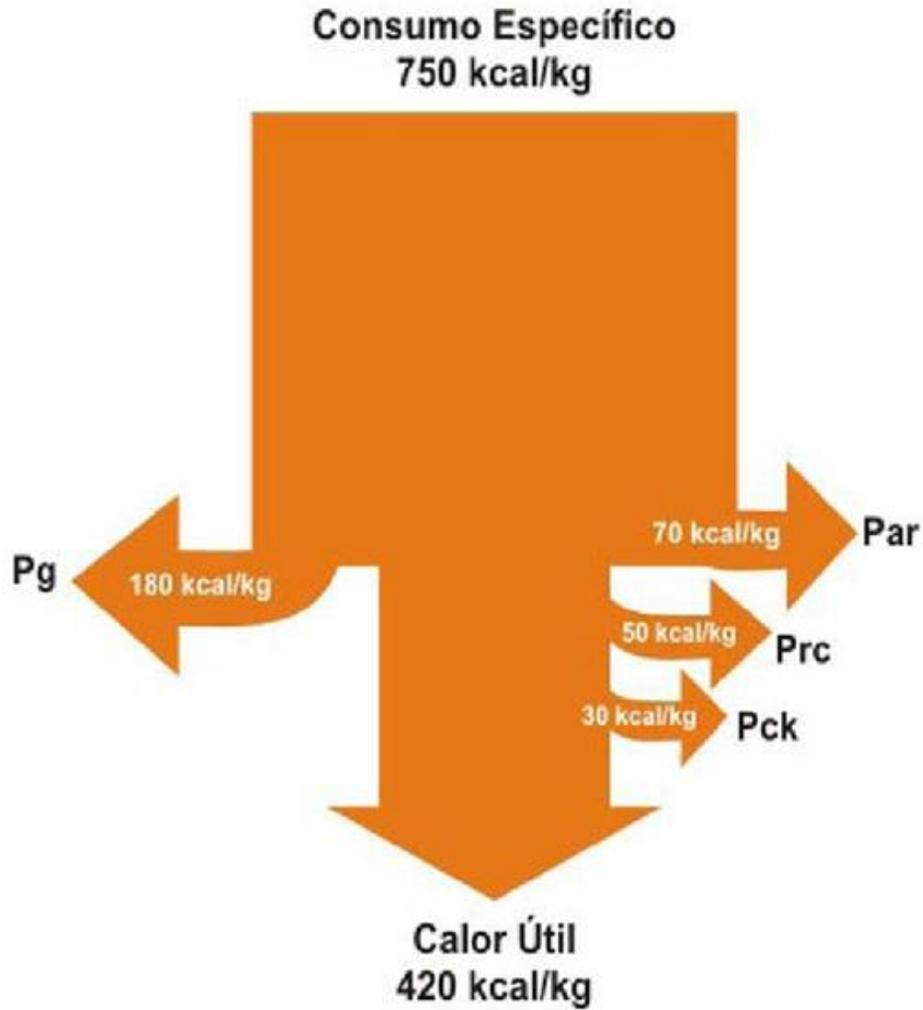
Bibliografía

- WORLD AND COAL INSTITUTE. (2015). *world and coal institute*.
http://www.worldcoal.org/assets_c/files/PDF/thecoalresourcef>.
- Arasthet, H. (1987). Experimental verification of a model of heat transfer through window. *ASHRAE Trans.*, 93, pp. 755-765.
- Beausoleil, P. Strachan. (1999). On the significance of modeling internal surface convection in dynamic whole-building simulation programs. *ASHRAE Trans.*, 105, pp 929-940.
- Bejan, A. (1993). *Heat transfer*. New York: John Wiley & Sons.
- Bhatti, M. S. et al . (1987). *Handbook of Single-phase Convective Heat Transfer*. New York: Wiley-Interscience.
- BRULHART. (2011). *Cement Holcim Manufacturing. Balances Térmicos*.
- CENGEL et al. (2007). *Transferencia de calor y masa. 3.ed*. Porto Alegre: Mcgraw- Hill.
- Claro., C. A. (2012). *CPI “Cement Performance Internacional”*. *Curso avanzado de clinkerización y cemento. Balances de calor; Hornos con precalentador; Combustibles y llamas*. Colombia.
- Estrella Condezo, Y.E. (2003). *CPI “Cement Performance Internacional Ltd”*. *Curso avanzado de clinkerización y cemento. Principios del control de calidad*.
- DUDA, Walter, H. (s.f.). *Cement Data Book*.
- Engeneering toolbox*. (s.f.). www.engineeringtoolbox.com/air-properties_d_156.html.
- Fernandez, I. J. (s.f.). http://www.edutecne.utn.edu.ar/maquinas_termicas/01-poder_calorifico.pdf
- FLSMIDTH. (2012). *Manual de Teoría de la Combustión*.
- FLSMIDTH. (2017). *Manual de Teoría de Química del clinker*.
- FLSMIDTH. (2018). *Curso de Teoría de Pyro Process y diseño de Sistemas Horno*.
- Fred., G. (2011). Optimization of burner Kiln 7. pp. 11-15.
- HENDRICKS, C. (2004). <http://www.wbcds.org/web/projects/cement/tf1/prghgt42.pdf>>.

- HOLCIM. (2006). *Cement Manufacturing Course, Technical documentation 4. Process Technology*.
- HOLDERBANK MANAGEMENT & CONSULTING LTD. (1998). *Balances térmicos de hornos y enfriadores así como temas relacionados con ellos*. Seminario de cemento. Maracay, Venezuela.
- Holman, J. P. (1998). *Transferencia de calor*. Mc Graw Hill.
- Incropera, F.P., DeWitt, D.P. (2002). *D.P., Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. New York: Jhon Wiley & Sons.
- Isachenko et al. (1979). *Transmisión del calor*. Maracombo.
- LAFARGE. (2010). *Cement Process Engineering Vade-Mecum*. México.
- McGrattan et al. (s.f.). *Thermal radiation from large pool fires*. Nistir.
- Nergiza. (2013). *Nergiza*. <http://nergiza.com/radiacion-conduccion-y-conveccion-tres-formas-de-transferencia-de-calor/>
- Ojotin et al. (1988). *Fundamentos de termotecnia*. Mir.
- Quimitube*. (s.f.). www.quimitube.com/termodinamica-teor-4-transferencia-energia.
- Rincon, J. (2009). *Evaluación del Consumo calórico en la producción de clinker en un horno rotatorio vía seca a partir de un análisis basado en balances de masa y energía*. Colombia.
- S.A., CEMENTOS CIENFUEGOS(CCSA). (2019). *Sistema de Gestión Integrado. Procedimiento de Operación Línea 3*.
- Salinas, E. (1995). *Programa de capacitación en el proceso de producción de cemento, Cemento Argos planta Río Claro*.
- Taborda, J. M. (2009). *Scribd*. <http://es.scribd.com/doc/99727238/Analisis-Calorico-de-Produccionde-Clinker-de-Cemento-Mediante-Balances-de-Masa-y-Energia#scribd>
- World Bussiness*. (2007). <http://www.wbcds.org/DocRoot/CgQLxwjL4ugeicXKUMmx/making-cementsustainable.pdf>>.

anexos.

Anexo I. Digrama de Sanket.



De donde:

Pg = Calor perdido en los gases de salida,

Par= Calor sensible perdido en el aire residual,

Prc= Calor sensible perdido en el Clinker,

Pck = Calor perdido por radiación y convección,

Calor útil= Calor utilizado para la clinkerización

Anexo I. Requisitos del refractario del horno.

Resistencia mecánica: los valores exigidos de resistencia mecánica para los ladrillos de refractario con alto contenido en Al_2O_3 es de 350-500 kg/cm^2 , y para los ladrillos de dolomita o magnesita 500-700 kg/cm^2 . Se puede determinar fácilmente en frío la resistencia mecánica de los ladrillos refractarios y es un punto de partida para el comportamiento de los ladrillos a la temperatura de trabajo del horno. Se ha de tener presente la estabilidad de la envolvente de chapa del horno y sus deformaciones durante la explotación. La deformación máxima, es decir, la desviación de la forma circular del cilindro de chapa, se presenta en la proximidad de los aros de rodadura y apoyo del horno. La deformación radial, llamada ovalidad, es decir, la diferencia de longitud entre el diámetro vertical y el horizontal de la sección del horno durante el giro puede llegar hasta el 0.3% del diámetro. Si el forro refractario no es capaz de absorber esta compresión y descompresión cíclicas, éstas pueden llegar a destruirlo.

Poder refractario bajo presión: la estabilidad frente a la carga térmica bajo presión se mide por la temperatura a la que el material refractario comienza a reblandecerse bajo una presión de 2kg/cm^2 . Una mayor estabilidad de la carga térmica bajo presión no es, en absoluto, un indicio de buen comportamiento pues pueden aparecer dificultades para la formación de costra protectora.

Estabilidad ante los cambios de temperatura: durante una vuelta del horno, que de modo normal dura un minuto, el revestimiento refractario del horno queda expuesto una vez a la acción de la alta temperatura de los gases del horno, y otra a la del material en reacción que está más frío. Las variaciones periódicas de temperatura de la superficie del ladrillo son del orden de los 400°C . A la capacidad de soportar estos cambios tan reiterados de temperatura se designa como resistencia ante los cambios de temperatura. Los ladrillos de alto contenido en alúmina han de soportar de 15-25 ciclos, los de magnesita de 5-15 ciclos.

Capacidad de resistencia química: cuando la carga de sólido a cocer presenta alto contenido en CaO (65%) ofrece un carácter fuertemente básico. A las altas temperaturas de la zona de sinterización, el material presenta una actividad química muy intensa frente al revestimiento del horno. En esta zona el material contiene del orden del 20-25% de fase fundida, lo que eleva aún más la reactividad frente al ladrillo. La agresión química por el material en la zona de sinterización afecta a casi todos los materiales refractarios, excepto

aquellos que tienen carácter básico como la dolomita y la magnesita y son por ello inmunes a la reacción química del clinker.

Dilatación por el calor o estabilidad de volumen: a pesar de que la chapa del cilindro envolvente del horno tiene un coeficiente de dilatación más alto que el del forro, la dilatación lineal es menor. Esto ocurre porque normalmente la temperatura de la chapa no rebasa los 280-365 ° C mientras que la media del revestimiento refractario es de 800-900° C. En la zona de sinterización, la cara interna puede llegar hasta unos 1350-1400°C y pueden producirse fuertes compresiones que conduzcan al descostramiento de la cara superior del ladrillo.

Conductividad térmica y espesor de refractario: la conductividad térmica es un factor decisivo en la pérdida de calor por la piel del horno. Para la mayoría de los refractarios la conductividad térmica crece con la temperatura, pero en la magnesita y la dolomita ocurre lo contrario. La conductividad térmica depende, en gran parte, de la porosidad del material refractario. La chapa del horno tiene un coeficiente de conductividad $\lambda=40\text{kcal/mh}^\circ\text{C}$, si la conductividad del forro refractario es demasiado elevada se produce entonces una mayor elevación de la temperatura de la chapa, con mayores pérdidas de calor. Por otro lado una conductividad baja dificulta la formación de costra protectora. Junto con la conductividad térmica tiene gran importancia el espesor del revestimiento refractario. Los espesores recomendados en función del diámetro del horno son los siguientes:

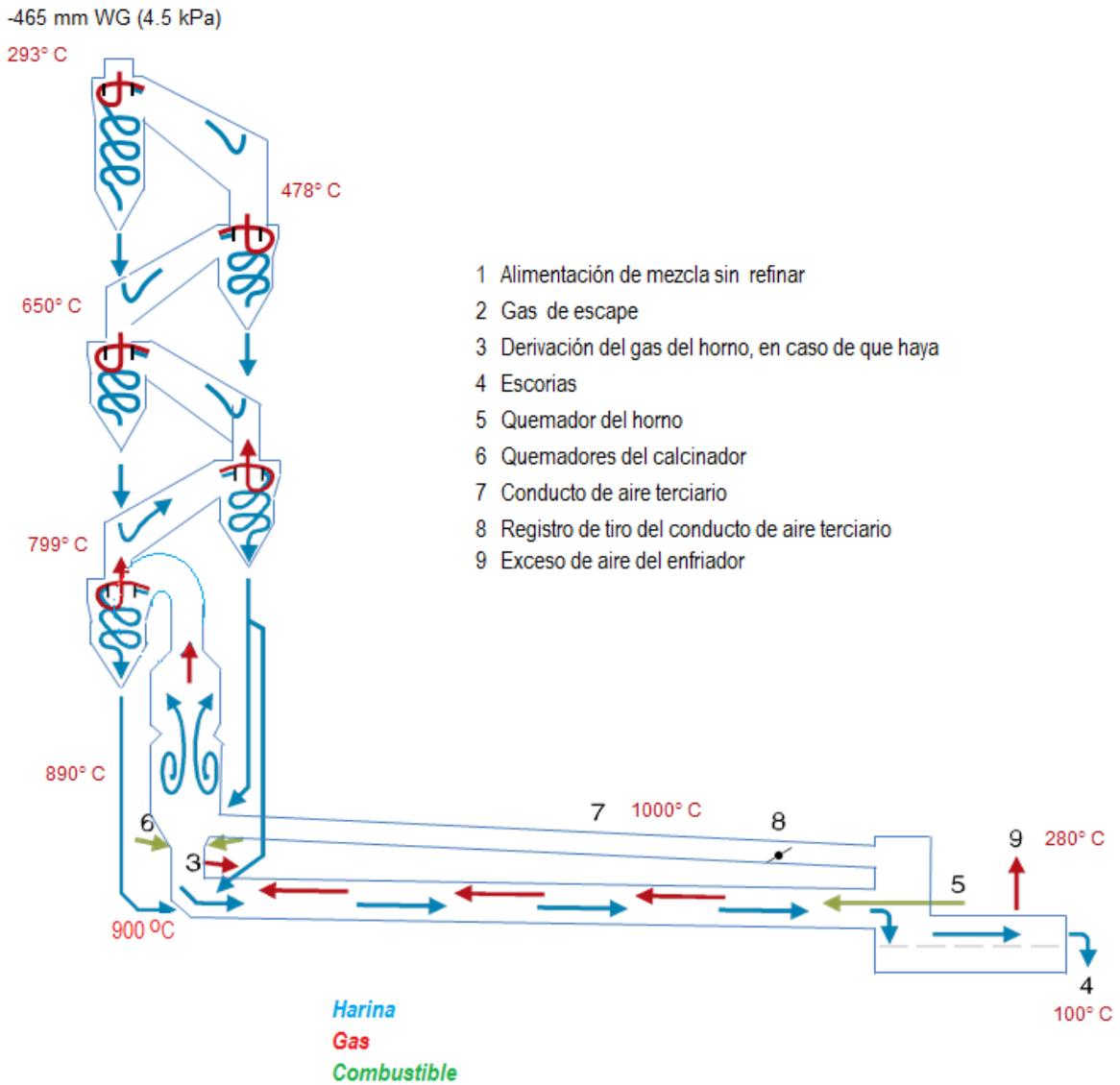
Diámetro del horno rotatorio, m	Espesor del ladrillo, mm
Hasta 3.60	180
3.60 - 4.20	200
4.20 – 5.20	230
Más de 5.20	250

Por un lado, mayor espesor del revestimiento disminuye el volumen útil del horno y con ello su caudal; por otro, sin embargo, el mayor espesor eleva la economía térmica del horno puesto que rebaja las pérdidas por radiación.

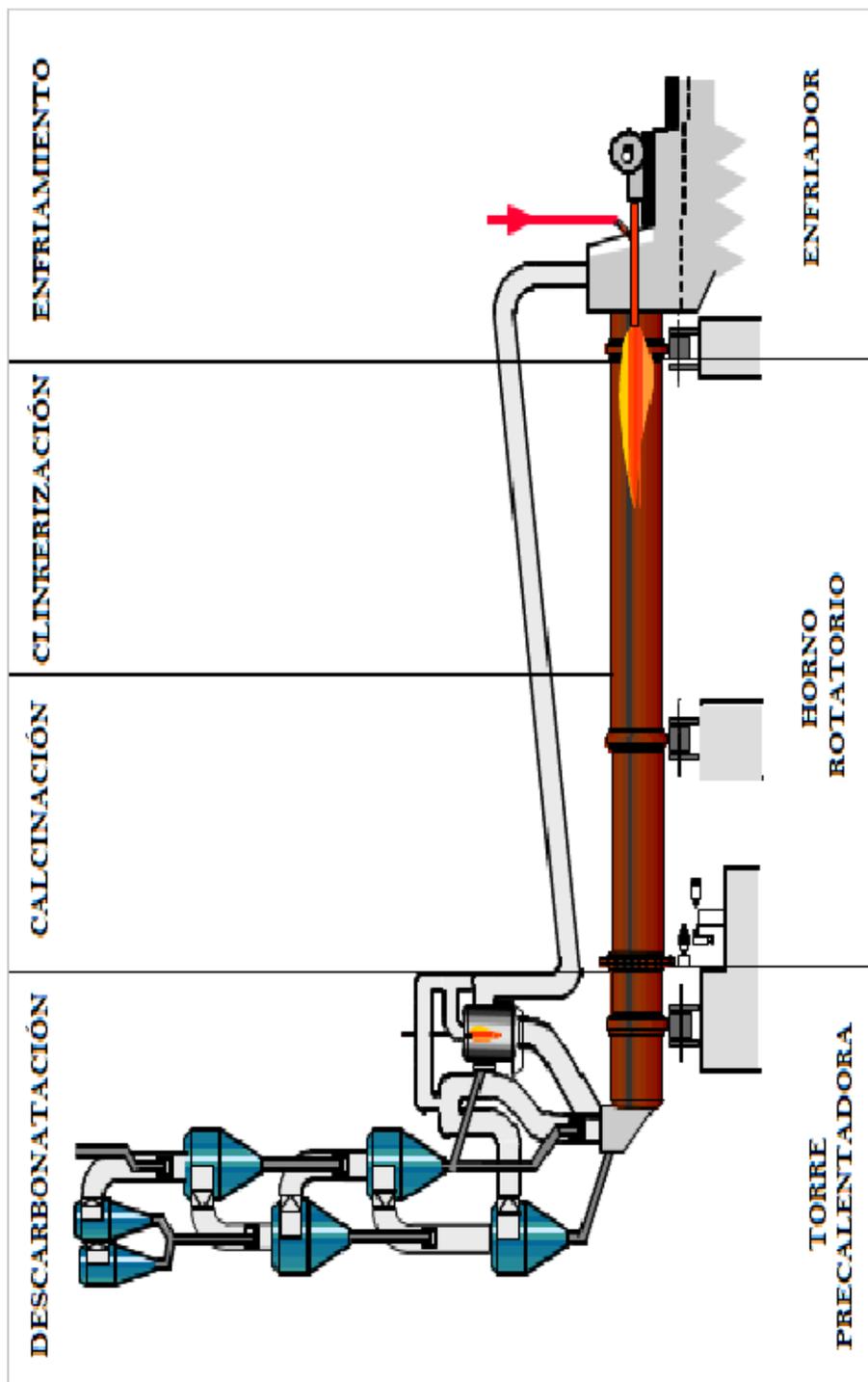
Resistencia al rozamiento; el material que resbala sobre el revestido refractario durante la rotación del horno produce rozamiento sobre los ladrillos. La resistencia al rozamiento también depende de la resistencia a la compresión del ladrillo refractario. La resistencia al

rozamiento se mide en cm^3 por cm^2 de la superficie expuesta al rozamiento. Los ladrillos refractarios de magnesita y de dolomita con alto contenido de alúmina han de ofrecer una resistencia al rozamiento no superior a $0.2 \text{ cm}^3/\text{cm}^2$. Los ladrillos refractarios con una resistencia al rozamiento mayor a $0.25 \text{ cm}^3/\text{cm}^2$ no se han de utilizar para revestir el horno rotatorio.

Anexo III. Precaentador de V etapas. Campo de temperaturas.

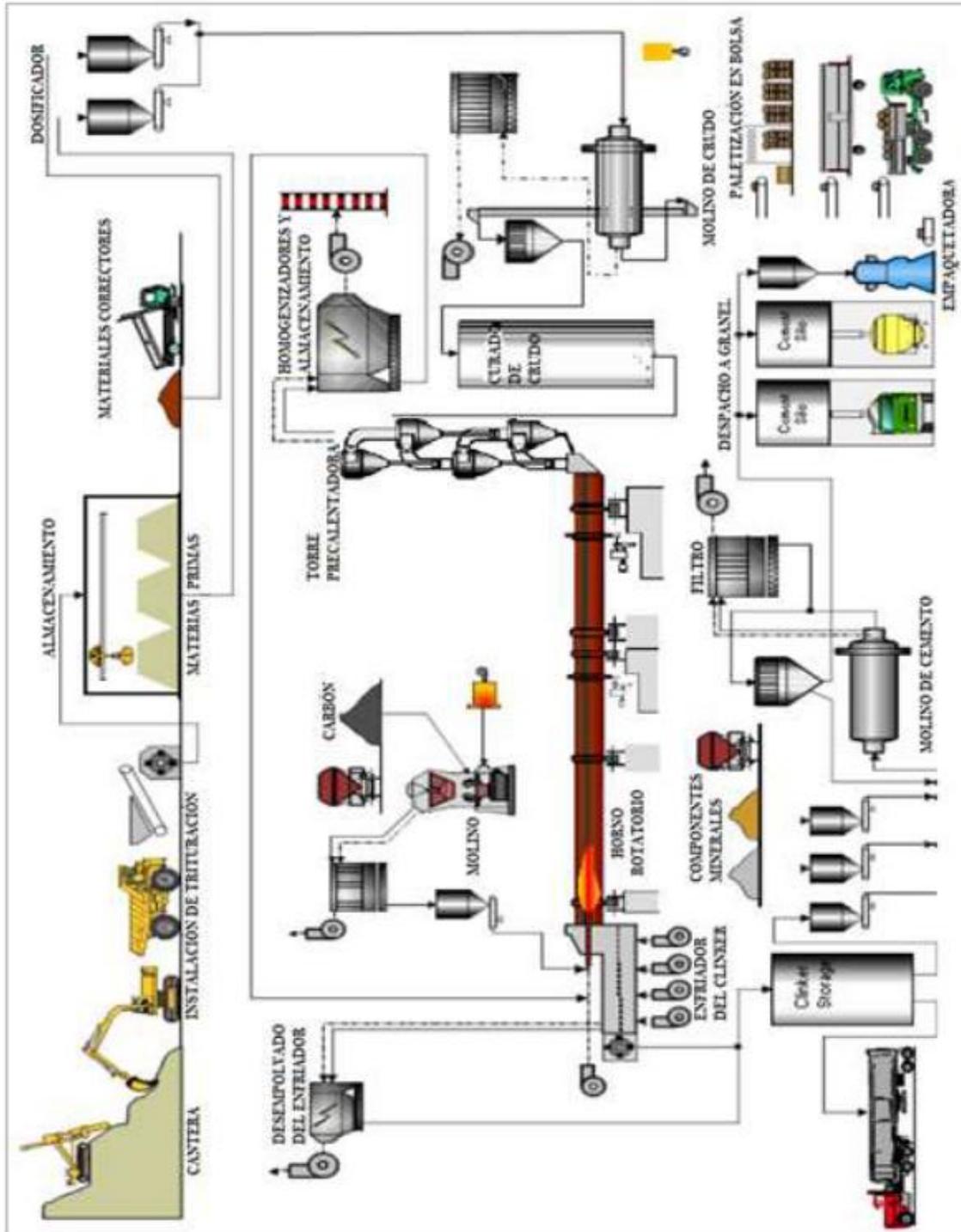


Anexos IV. Zonas del Horno de clinker.



Fuente: Adaptado a partir de FLSmidth, 2012.

Anexo V. Diagrama de Flujo del Proceso de Fabricación de Cemento Portland con horno tipo seco y precalentador.



Fuente: Holcim, 2006.

Anexo VI. Descripción de la toma de datos en la planta.

Antes de realizar la toma de datos en planta, se debe tener presente que se trata de realizar un balance de masa y energía, dentro de los límites de control determinados para el sistema del horno, por lo que, todos los datos deben medirse o registrarse cuando la producción del horno sea constante y el horno esté operando en condiciones normales de mayor equilibrio posible, es decir, no existan fluctuaciones importantes en el ratio de alimentación de crudo, combustible, presiones, temperaturas y velocidades de flujo en el sistema y durante el período de tiempo planificado para realizar las mediciones.

Temperaturas de las paredes del pre-calentador y del enfriador: Debido a que las temperaturas de las superficies del pre-calentador y del enfriador, no varían demasiado según la bibliografía, se pueden tomar estas medidas en un día diferente a la toma de muestras en general, debido a que esta toma de datos puede ser demasiado demorada.

Velocidad del viento: Para medir este parámetro, fue utilizado debidamente verificado, la velocidad del viento no suele superar los 11 km/h.

Temperaturas a lo largo del horno: Para tomar las temperaturas a lo largo del horno, no se ha establecido un punto de muestreo, sin embargo en esta parte del documento se aclara que no se puede tomar todas las temperaturas a lo largo del horno, pero si se puede tomar mediciones de temperatura a distintas distancias del horno, para luego obtener un promedio de estas y utilizar el valor para el cálculo. Estas distancias a las que se ha tomado la temperatura coinciden con las registradas por el pirómetro de control de horno. Estas fueron tomadas desde el panel en 3 dimensiones y desde el mismo horno.



Puntos 3, 4, 5, 6 y 7: Estos puntos se encuentran ubicados en los ciclones del precalentador. Aquí se mide la temperatura de las paredes de cada etapa en el precalentador, datos que nos sirve para calcular las pérdidas de calor a través Del pre-calentador; para medir con más

exactitud se hace 4 mediciones, uno a cada lado de la pared de la parte cilíndrica y otras 4, siguiendo el mismo proceso a cada lado de las 4 paredes del pre-calentador en la parte cónica y posteriormente se obtiene un promedio; para esto se puede hacer uso de un termógrafo o del pirómetro óptico, pero el termógrafo nos permite ver mejor como están distribuidas las temperaturas en cada ciclón. La manera de toma de datos descrita sirve para cada uno de los ciclones a excepción de los ciclones de la primera etapa, los cuales, en el último piso tienen la parte cilíndrica a ras del suelo, pero la parte cónica se encuentra en el sexto piso del pre-calentador, a una distancia considerable con respecto al suelo, por lo que al tomar los datos se estará muy alejado del punto de donde se planea realizar la medida, por lo que no se realizaron mediciones en la parte cónica de esa etapa. De estas 8 mediciones obtenidas en cada ciclón se calcula un promedio y esta será la temperatura general del ciclón. Además en esta zona de muestreo se encuentran también los ductos del pre-calentador; para la toma de temperaturas de éstos se toma una temperatura de cada ducto en cada piso, de una temperatura en la parte superior de un ducto y otro en la parte inferior, para finalmente obtener un promedio de todas las temperaturas tomadas en los ductos.

Fotos 18, 19, 20, 21 y 22. Punto de muestreo N°12: Paredes del enfriador

Fuente: El autor



Punto 12: Este es el punto de muestreo para las temperaturas superficiales del enfriador. En este punto, para la toma de muestras se toma mínimo una medida de temperatura en cada pared del enfriador. Debido a la accesibilidad se hicieron 2 medidas en cada pared del enfriador y se realizó una medición más cerca de la salida del material del horno. De todas estas 13 mediciones se obtendrá un promedio y el resultado servirá como temperatura general de las paredes del enfriador.



Fotografía 6: Toma de temperatura del Riser y calcinador.



Fotografía 5: Toma de temperatura del horno rotatorio.

Anexo VII. Cálculo de áreas

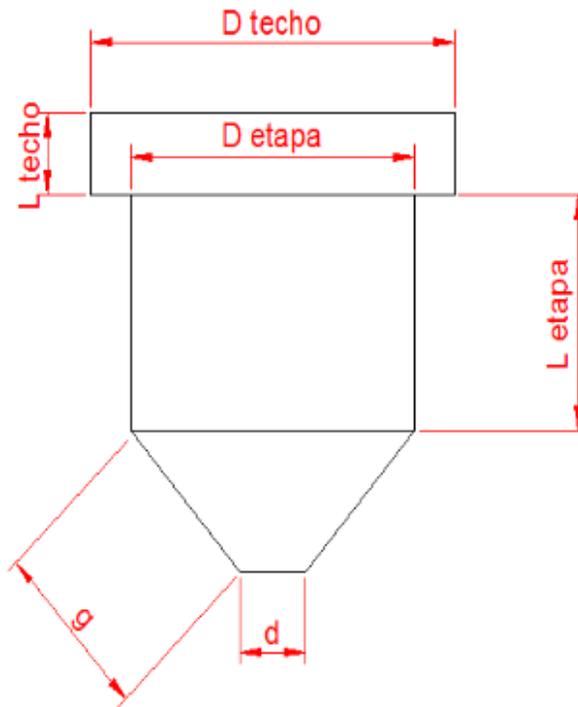
Área de las paredes del horno: para el cálculo del área del horno, se toma a este como si fuese un cilindro y se calcula su área:

$$A_{\text{horno}} = \pi D_{\text{horno}} L_{\text{horno}}$$

Área de las paredes de las etapas del pre-calentador: para el cálculo aproximado del área del pre-calentador, se toma a este como si fuese un conjunto de conos truncados y cilindros y se calcula su área:

$$A_E = \pi D_{\text{Etapa}} L_{\text{Etapa}} + \frac{\pi}{2} g(D + d) + \pi D_{\text{Techo}} L_{\text{Techo}} + \frac{\pi}{4} \times (D_{\text{Techo}}^2 - D_{\text{etapa}}^2)$$

De donde:



Gráfica: Forma básica de estructura de un ciclón y la nomenclatura a ser usada para esta sección