



**DISEÑO MECÁNICO DE HORNO ROTATORIO DE FUNCIONAMIENTO
HORIZONTAL**

SANTIAGO ORDUZ ALADINO

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA
SANTIAGO DE CALI
2012**

**DISEÑO MECÁNICO DE HORNO ROTATORIO DE FUNCIONAMIENTO
HORIZONTAL**

SANTIAGO ORDUZ ALADINO

Proyecto de grado para optar al título de Ingeniero Mecánico

**Adolfo León Gómez Perlaza, M.Sc.
Ingeniero Mecánico
Director del Proyecto**

**Nicolás Javier Gil Zapata, Ph.D.
Ingeniero Químico
Codirector del Proyecto**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA
SANTIAGO DE CALI
2012**

Nota de aceptación:

Firma del jurado

Firma del jurado

Firma del director

Firma del codirector

Santiago de Cali, Marzo 2 de 2012

CONTENIDO

	Pág.
Introducción	8
1. Justificación.....	9
2. Objetivos	10
2.1 Objetivo General	10
2.2 Objetivos Específicos.....	10
3. Antecedentes	11
4. Marco Teórico	14
4.1 Tipos de Cal.....	15
4.1.1 Cal viva	15
4.1.2 Cal hidratada.....	15
4.1.3 Cal hidráulica	15
4.2 Hornos de Calcinación.....	15
4.3 Tipos de Hornos	16
4.3.1 Hornos verticales.....	16
4.3.2 Hornos verticales a contracorriente	16
4.3.3 Hornos verticales de corriente paralela regenerativos	16
4.3.4 Horno Rotativo	16
4.3.5 Horno rotativo con precalentador	17
4.4 Características de Materiales	18
4.4.1 Piedras Caliza	18
4.4.2 Oxido de Calcio	18
4.4.3 Combustibles	18
5. Reconocimiento del proceso	19
6. Desarrollo	24

6.1	Componentes estructurales	26
6.1.1	Geometría y dimensionamiento.....	28
6.1.2	Análisis estructural	32
6.1.3	Momentos y cortantes	34
6.1.4	Momento torsor	35
6.1.5	Chapa metálica	36
6.1.6	Pistas de rodadura	39
6.1.7	Rodillos de apoyo.....	41
6.1.8	Ejes de rodillos	43
6.1.9	Rodamientos	44
6.1.10	Rodillos de posicionamiento.....	48
6.1.11	Estructura.....	49
6.2	Análisis térmico.....	55
6.2.1	Refractario.....	56
6.2.2	Balance energético.....	58
6.2.3	Tipo de combustible	61
6.2.4	Aire para combustión	62
6.2.5	Consumo de combustible.....	65
6.2.6	Transferencia de calor.....	66
6.3	Funcionamiento y control.....	70
6.3.1	Accionamiento.....	70
6.3.2	Transmisión.....	71
6.3.3	Variador.....	73
6.3.4	Instrumentación.....	74
7.	Conclusiones.....	79
8.	Referencias	80
	Anexo 1.....	84

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Piedra caliza.	19
Figura 2. Horno vertical de funcionamiento estacionario.	20
Figura 3. Horno vertical industrial.	21
Figura 4. Alimentación en horno vertical industrial.	21
Figura 5. Horno vertical piloto.	22
Figura 6. Diagrama de proceso.	23
Figura 7. Horno rotatorio horizontal.	25
Figura 8. Diagrama de desarrollo del diseño.	26
Figura 9. Hoja de cálculo. Módulo: Dimensionamiento.	27
Figura 10. Hoja de cálculo. Módulo: Cargas.	28
Figura 11. Hoja de cálculo. Módulo: Componentes.	28
Figura 12. Vista frontal del cilindro.	31
Figura 13. Vista lateral del cilindro.	32
Figura 14. Viga continua de 4 apoyos con carga distribuida.	32
Figura 15. Diagrama de momentos y cortantes.	34
Figura 16. Cargas sobre pistas de rodadura.	40
Figura 17. Contacto cilíndrico.	41
Figura 18. Carga sobre eje de rodillo.	43
Figura 19. Rodamiento SKF 22217EK+H317.	45
Figura 20. Soporte de dos piezas SKF FSNL 517.	45
Figura 21. Unidad de rodamiento con soporte SKF SYNT 75 LTF.	46
Figura 22. Cargas equivalentes y vida nominal.	47
Figura 23. Rodillo de leva con eje SKF KRV90 PPA.	48
Figura 24. Cargas equivalentes y vida nominal.	49
Figura 25. Vista isométrica de la estructura.	50
Figura 26. Sección de perfil W.	50

Figura 27. Elemento tipo viga <i>BEAM189</i>	51
Figura 28. Malla de la estructura evaluada.	52
Figura 29. Esfuerzos combinados. Perfil W150x13.5.	53
Figura 30. Esfuerzos combinados. Perfil W150x18.0.	54
Figura 31. Esfuerzos combinados. Perfil W100x19.3.	54
Figura 32. Distribución térmica y tipo de refractario.	57
Figura 33. Flujo energético del proceso.	58
Figura 34. Variación del exceso de aire en combustión.	62
Figura 35. Eficiencia de combustión.	63
Figura 36. Transferencia de calor en cilindro hueco.	66
Figura 37. Variación de la temperatura en el refractario.	68
Figura 38. Flujo de calor en el refractario.	69
Figura 39. Accionamiento eléctrico SIEMENS 1LE1621-1CC2.	71
Figura 40. Engranaje de dientes rectos.	72
Figura 41. Variador para accionamiento eléctrico.	74
Figura 42. Pirómetro digital.	75
Figura 43. Termocuplas.	76

Lista de Tablas

Pág.

Tabla 1. Presión de descomposición del carbonato de calcio.	14
Tabla 2. Parámetros de diseño.	29
Tabla 3. Condiciones operativas del horno.	30
Tabla 4. Determinación de cargas sobre la estructura cilíndrica.	33
Tabla 5. Magnitud de reacciones, momentos y cortantes.	34
Tabla 6. Clasificación NEMA para motores comerciales.	35
Tabla 7. Características de pistas y rodillos.	42
Tabla 8. Esfuerzos y factor de seguridad en rodillos.	42
Tabla 9. Cargas radial y de empuje por rodamiento.	47
Tabla 10. Referencias de perfil W evaluadas.	51
Tabla 11. Esfuerzo y deformaciones estructurales.	52
Tabla 12. Independencia de malla.	55
Tabla 13. Entalpías de formación.	59
Tabla 14. Requerimientos energéticos de referencia.	60
Tabla 15. Composición típica del gas natural en Colombia.	61
Tabla 16. Requerimiento energético.	65
Tabla 17. Coeficiente de transferencia de calor por convección.	67
Tabla 18. Características conjunto piñón-corona.	73
Tabla 19. Termocuplas metálicas.	77

Introducción

Industrias conformadas por pequeñas y medianas empresas suelen establecer metodologías de producción según experiencias propias y/o lineamientos de las personas a cargo del proceso productivo. Es común encontrar tecnologías adaptadas de otras industrias y maquinaria modificada a través de proyectos de reingeniería que buscan optimizar la eficiencia de los procesos productivos y la calidad de los productos.

El objetivo de este proyecto fue documentar el diseño mecánico de un horno rotatorio de funcionamiento horizontal, que busca brindar herramientas de desarrollo tecnológico a empresas que centran su actividad productiva en el procesamiento de calizas.

La construcción del equipo como herramienta de investigación a nivel piloto, depende de la aprobación de presupuesto por parte de alguna de las instituciones involucradas dentro del acompañamiento realizado por el Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia (Cenicaña), a empresas productoras de Oxido de Calcio de la región de Vijes, en el Valle del Cauca, donde se busca reconocer y controlar las variables que determinan la calidad y homogeneidad en las propiedades de los productos, proponiendo cambios metodológicos y en los equipos que intervienen en el proceso de calcinación.

1. Justificación

Es de gran importancia en las industrias en general conocer y controlar las variables que determinan la calidad de procesos y productos, y tener parámetros fijos que garanticen un alto rendimiento en producción y estabilidad en las características y propiedades de los productos obtenidos.

En la etapa de clarificación del proceso de producción de azúcar en los Ingenios azucareros de la región se remueven las impurezas tanto solubles como insolubles presentes en el jugo de caña extraído en la etapa de molienda (previa a la etapa de clarificación), empleando, en general cal y calor como agentes clarificantes. Se utiliza Hidróxido de Calcio (producto natural obtenido de mezclar Oxido de Calcio y agua) para neutralizar la acidez natural de los jugos de caña (pH aproximado de 5,2) formando sales insolubles de Calcio, lo que eleva su pH, minimizando posibles pérdidas de sacarosa [1].

Desde Cenicaña se planteó el acompañamiento a productores de Oxido de Calcio, sugiriendo el diseño de un horno rotatorio a nivel piloto que sirva como herramienta de investigación a menor escala y con menos compromiso de recursos para la realización de seguimientos experimentales que permitan estudiar, identificar y controlar las variables de mayor impacto en el proceso de calcinación de piedra caliza buscando establecer procesos productivos estables que permitan obtener productos de mejor calidad con propiedades homogéneas.

En la región (Valle del Cauca) no es común encontrar hornos rotatorios de funcionamiento horizontal en procesos de calcinación de calizas, no hay industria nacional dedicada a su producción o ensamble y los equipos de los que se tiene información funcionan actualmente son importados.

Como proyecto para optar al título de Ingeniero Mecánico se planteó desarrollar la labor de diseño mecánico, selección de componentes e instrumentación y modelamiento estructural de un horno piloto rotativo de funcionamiento horizontal para producción de Oxido de Calcio.

2. Objetivos

2.1 Objetivo General

Realizar el diseño de un horno horizontal rotatorio para producción de Oxido de Calcio.

2.2 Objetivos Específicos

- Analizar las condiciones operativas de un horno calcinador de piedra caliza.
- Determinar la geometría de un horno horizontal rotatorio.
- Realizar un análisis estructural del diseño planteado.
- Analizar el fenómeno de transferencia de calor y el balance energético del proceso.
- Seleccionar componentes mecánicos y de instrumentación.

3. Antecedentes

La cal es uno de los productos químicos más antiguos conocidos por el hombre. Su producción y usos se han incrementado a través del tiempo y continúa ocupando un lugar esencial en la industria moderna. La misma es empleada en una amplia gama de industrias con diversos fines.

Es el producto que se obtiene calcinando la piedra caliza (principalmente compuesta por Carbonato de Calcio – CaCO_3) por debajo de la temperatura de descomposición del Óxido de Calcio, en un proceso que libera Dióxido de Carbono. A gran escala, se calcina el Carbonato de Calcio en hornos para producción de Óxido de Calcio [2].

Múltiples trabajos de grado relacionados con el diseño y construcción de hornos rotatorios de altas temperaturas y procesos de calcinación mineral desde distintas ingenierías de la Universidad del Valle se han desarrollado desde hace unos 27 años. Un proyecto de investigación a cargo del Ingeniero Alejandro Salazar, profesor de la Escuela de Ingeniería de Materiales, se desarrolló entre mediados de la década de los 80 y mediados de los 90, en el que se realizó el diseño, construcción y puesta en marcha de un horno de altas temperaturas (mayores a 1000°C).

Estudiantes de los programas de Ingeniería Mecánica e Ingeniería Química participaron en el proyecto realizando inicialmente, en 1984, el diseño mecánico [3], y diseño térmico y recomendaciones de operación [4], respectivamente de un horno rotatorio de alta temperatura.

Luego, en 1990, se realizó un trabajo de rediseño [5] de lo planteado años atrás y se empezó la construcción del horno rotatorio. Dicha labor estuvo a cargo de estudiantes de Ingeniería Mecánica a través de su trabajo de grado y se finalizó dos años después en 1992 con el trabajo de grado de otro estudiante también del programa de Ingeniería Mecánica. Este realizó nuevos cambios [6] al diseño inicial planteado del horno y finalizó su construcción, entregando un equipo en funcionamiento pero aun sin el material refractario necesario para realizar pruebas a altas temperaturas.

Años después, en 1994 se retomó el proyecto por parte de estudiantes de Ingeniería Química que bajo la dirección del Ingeniero Salazar se propusieron seleccionar e instalar el refractario del horno rotatorio [7], haciendo las adecuaciones necesarias para la producción de cemento Portland.

Se encontró otro trabajo de grado que data de 1996, en el que se vuelve a plantear la instalación del revestimiento refractario y la puesta en marcha del mismo horno rotatorio [8]. Además, según el documento se revisaron y corrigieron posibles fallas en el funcionamiento mecánico, se realizaron diferentes pruebas que contribuyeron a su correcta operación y se entregó en funcionamiento, disponible para la realización de pruebas de producción a altas temperaturas.

Así, en 1996 se dio por terminado el proyecto de investigación que se desarrolló a lo largo de más de 10 años. El equipo diseñado, construido y puesto en funcionamiento gracias al trabajo de los estudiantes bajo la dirección del Ingeniero Salazar y con participación de profesores de los programas de Ingeniería Mecánica e Ingeniería Química, quedó a disposición de la comunidad Universitaria.

Se encontró otro trabajo relacionado con hornos rotatorios y producción de cal, data del año 2003. Estudiantes del programa de Ingeniería de Materiales de la Universidad del Valle realizaron como proyecto de grado el rediseño de un horno rotatorio para calcinación de piedra caliza [9], dicho proyecto plantea e estudio del desempeño mecánico, rendimiento y variables del proceso productivo, y evaluación completa del horno rotatorio utilizado en la planta de la empresa *Productos Súper M.A. Tabares S. en C.* con el fin de incrementar su capacidad de producción y mejorar la calidad de los productos. Durante el desarrollo del proyecto los estudiantes se enfrentaron a un proceso productivo real con un horno de producción a gran escala (longitud de 30 metros y producción de entre 28 y 32 toneladas por día), modificando los procedimientos de producción controlando las variables y parámetros del proceso, logrando según el documento, incrementar el rendimiento de la planta y mejorar la calidad de la cal producida.

Se tiene información muy limitada sobre grandes hornos rotatorios de longitud mayor a 50 metros, propiedad de empresas papeleras de la región [10].

Actualmente, no hay en Colombia industria dedicada al diseño y construcción de hornos rotatorios para procesos productivos a altas temperaturas, por lo que empresas que requieren este tipo de equipos se ven obligadas a importarlos o realizar ellas mismas la labor de diseño y construcción.

4. Marco Teórico [11]

El proceso de calcinación de piedra caliza conlleva una reacción reversible que alcanza el equilibrio cuando en contacto con la caliza y la cal existe una determinada concentración o presión parcial de CO₂. La presión de equilibrio se llama presión de descomposición del Carbonato de Calcio. Si a cualquier temperatura la presión parcial del CO₂ es inferior a la del equilibrio, se descompondrá la caliza para incrementar dicha presión al valor de equilibrio.

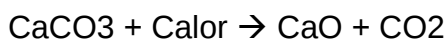
En cambio, si la presión parcial es superior a la de equilibrio, la cal se combinará con el dióxido de carbono para formar el carbonato, y la presión descenderá al valor de equilibrio. Los valores de equilibrio para la presión del dióxido de carbono (en mm de Hg) a diversas temperaturas son:

Tabla 1. Presión de descomposición del carbonato de calcio.

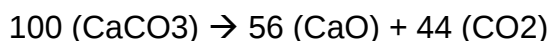
Temperatura (°C)	500	600	700	800	900	1000
Presión (kPa)	0,014	0,313	3,373	22,398	103,057	361,302

En la fabricación de la cal, la presión parcial del dióxido de carbono se mantiene inferior a la del equilibrio impulsando a través del horno una corriente de aire que arrastra el CO₂ y mantiene una atmósfera pobre en este gas. Se evita elevar mucho la temperatura en el horno para que la arena de la caliza no se combine con la cal, formando escoria. La cal producida a temperatura excesiva se conoce como cal muerta (cal quemada) y se apaga muy lentamente.

Proceso de disociación del carbonato de Calcio:



Peso molecular aproximado para la reacción:



Se estima que el 10% de la piedra caliza procesada sale como material incocido o requemado.

4.1 Tipos de Cal [2]

4.1.1 Cal viva

Se obtiene de la calcinación de la caliza que al desprender Dióxido de Carbono, se transforma en Oxido de Calcio. La cal viva obtenida debe estar en capacidad de combinarse con agua, para pasar de óxido a hidróxido.

4.1.2 Cal hidratada

Se conoce con el nombre comercial de cal hidratada a la especie química de hidróxido de calcio, la cual es una base fuerte formada por el metal calcio unido a dos grupos hidróxidos.

4.1.3 Cal hidráulica

Cal compuesta principalmente de hidróxido de calcio, sílica (SiO_2) y alúmina (Al_2O_3) o mezclas sintéticas de composición similar. Tiene la propiedad de fraguar y endurecer incluso debajo del agua.

4.2 Hornos de Calcinación [12]

Los hornos que por lo general se emplean son construcciones de mampostería, ladrillo, sillarejo, etc., que se componen de tres partes principales: hogar, vientre y chimenea. El hogar se dispone siempre en la parte inferior; pero algunas veces es lateral y otras está ubicado en el centro del horno, según el tipo de horno. Dependiendo del combustible utilizado, el hogar puede tener una división para que en la parte inferior queden las cenizas generadas; ambos compartimientos deben ir provistos de puertas para regular la marcha del fuego. El vientre es la parte del horno donde se generan las temperaturas más altas y es donde tiene lugar la calcinación de la caliza.

Aunque, por lo general, los hornos de cal suelen reducirse a un muro cilíndrico o tronco-cónico, en algunos casos son construcciones más perfeccionadas: sus paredes están formadas de dos envolventes separadas por un hueco bastante considerable que se rellena de arcilla, arena, ceniza o cualquier otro elemento que actúe como aislante térmico.

4.3 Tipos de Hornos [12,13]

4.3.1 Hornos verticales

La teoría de calcinación ha demostrado que la manera más eficiente de producir cal de alta calidad es aplicar una cantidad considerable de calor al inicio de la calcinación, dado que la caliza se encuentra en forma de carbonatos y no se tendrá pérdida de calidad, mientras que al final del proceso de calcinación debe existir una disminución de la cantidad de calor a suministrar. Conociendo su mecanismo de transferencia de calor se pueden analizar los hornos verticales.

4.3.2 Hornos verticales a contracorriente

En estos hornos los gases calientes de combustión y el aire de enfriamiento ingresan por la parte baja del horno, zona que usualmente corresponde a la parte final de calcinación. Este proceso ocasiona que el producto final en la zona de calcinación se lleve por encima de la temperatura de calcinación de la piedra (800° C) obteniendo una cal sobre quemada, especialmente en aquellos puntos donde la distribución de los gases de combustión y el aire de enfriamiento no sea homogénea.

4.3.3 Hornos verticales de corriente paralela regenerativos

En los hornos regenerativos, los gases calientes ingresan por la parte superior del horno en donde exista la mayor diferencia de temperatura con la piedra caliza. Los gases de combustión se hacen pasar por la zona de calcinación transfiriendo el calor a la piedra caliza de la zona de precalentamiento, el cual será utilizado cuando el proceso se revierta. Este fenómeno es precisamente lo que hace que los hornos regenerativos sean económicos en el consumo de energía térmica.

4.3.4 Horno Rotativo

En funcionamiento similares a los utilizados en la industria de cementos, la caliza es alimentada por la parte posterior a través de un ducto integrado a la recámara del horno.

El flujo de material y de gases es a contracorriente pudiéndose definir en el horno tres secciones:

- Zona de precalentamiento

- Zona de calcinación
- Zona de enfriamiento

A medida que el material avanza en el interior del horno, se forman tres zonas bien definidas que dependen del tamaño de las partículas; las más grandes tienden a colocarse en la parte externa de la carga de material, lo más cercano al ladrillo, mientras que las partículas medianas y pequeñas tienden a moverse en el centro de la cama del material. El grado de llenado de estos hornos usualmente se encuentra en el orden del 10 al 12%.

Usualmente se construyen anillos de retención en el interior del horno en cada una de las zonas previamente enunciadas con el objetivo de aumentar el tiempo de retención del material en el horno.

Debido al diseño del horno tipo contracorriente, la cal producida en estos hornos tiende a ser sobre quemada especialmente cuando no se toman las medidas operativas adecuadas en el control de la temperatura dentro del horno o en la distribución granulométrica en la alimentación.

4.3.5 Horno rotativo con precalentador

Este tipo de horno combina las características de un horno vertical a contracorriente y un horno largo rotatorio. El material es alimentado por la parte superior del precalentador donde este sufre el proceso de precalentamiento (piedras grandes) y calcinación (piedras pequeñas). El material es dosificado al horno rotatorio a través de un sistema neumático que las dosifica al interior del tubo del horno donde las piezas segregan de acuerdo a su tamaño tal como se describió en el tema de horno rotatorio largo; protegiendo de esta manera las piezas ya calcinadas en el centro de la cama de material y las más grandes son calcinadas a lo largo del horno.

Debido al continuo movimiento que sufre la cama de material en el interior del horno rotatorio, las impurezas absorbidas en el precalentador son eliminadas y se obtiene un producto de mejor calidad.

4.4 Características de Materiales [12]

4.4.1 Piedras Caliza

- Carbonato de Calcio (CaCO_3): 53.5% mínimo
- Oxido de Magnesio (MgO): 1% mínimo
- Oxido de Silicio (SiO_2): 1% máximo
- Oxido de Aluminio (Al_2O_3) + Óxido de Hierro (Fe_2O_3): 0.6% máximo

4.4.2 Oxido de Calcio

- Oxido de Calcio (CaO): 93.25 – 98%
- Oxido de Magnesio (MgO): 0.3 – 1.5%
- Oxido de Silicio (SiO_2): 0.2 - 1%
- Oxido de Aluminio (Al_2O_3): 0.1 – 0.5%
- Oxido de Hierro (Fe_2O_3): 0.1 – 0.4%

4.4.3 Combustibles

- Se requieren 1000 – 1162 kcal/ton de cal viva producida
- Combustible sólido: Coque, mínimo 7000 Kcal/Kg.
- Combustible líquido: Diesel, gasolina, aceite combustible, etc.
- Gas combustible: Gas natural

5. Reconocimiento del proceso

Como parte del análisis de las condiciones operativas de hornos de calcinación, se realizó el reconocimiento del proceso de una empresa productora de óxido de calcio. Se realizaron visitas a la planta y se solicitaron especificaciones de los equipos involucrados en el proceso productivo. Todos los hornos de dicha empresa son verticales de funcionamiento estacionario, carentes de cualquier instrumento de medición.



Figura 1. Piedra caliza.

La piedra caliza que llega a la planta es almacenada en patio, cerca del punto de alimentación de uno de los hornos. Se realiza una selección visual del material considerado apto para ser procesado, el criterio de dicha selección es dimensional, solo se procesan piedras con diámetro medio aproximado entre 8 y 12 cm. Materia prima con mayor tamaño es fracturada en trozos menores, piedras por debajo del valor de selección son excluidas del material a procesar.

La alimentación del material se realiza manualmente en la parte superior del horno, donde se distribuyen capas intercaladas de piedra y carbón. La relación de combustible y piedra utilizada se ajusta según las propiedades estimadas de los

componentes antes nombrados, las cantidades a alimentar se determinan según criterio del personal encargado de la alimentación basándose en su experiencia.

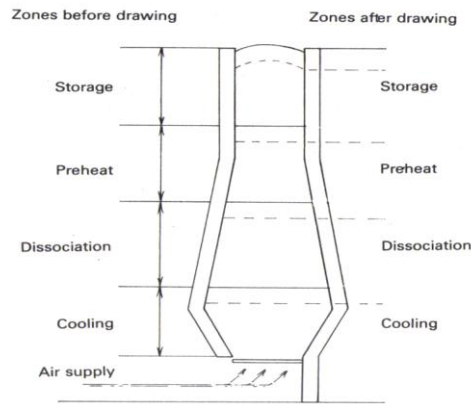


Figura 2. Horno vertical de funcionamiento estacionario.

La descarga del material se realiza en la parte inferior del horno, utilizando una parrilla compuesta por barras individuales. El tiempo de permanencia del material en el horno se determina de acuerdo al número de filas de ladrillo refractario (conocidas como hiladas) que baja el material en la parte superior del horno durante el proceso de calcinación.

La eficiencia del proceso productivo se determina con el porcentaje de material incocido y requemado (falta o exceso de calcinación). Se toman registros de la cantidad de cenizas en el producto procesado como indicador del proceso de combustión del carbón.

Como parte del acompañamiento por parte de Cenicaña a empresas de la región productoras de cal, se propuso la realización de un diseño de experimentos para los cuales se vinculó la estudiante del Programa de Ingeniería Química Nadia Isabel Mosquera, con el desarrollo de su Proyecto de Grado **“DIAGNOSTICO Y MEJORAMIENTO EN LOS PROCESOS DE CALCINACIÓN E HIDRATACIÓN APLICADOS EN UNA EMPRESA PRODUCTORA DE CAL”**.

Conjuntamente se realizó un análisis inicial de los materiales involucrados en el proceso y de las condiciones de funcionamiento de uno de los hornos calcinadores.



Figura 3. Horno vertical industrial.

El equipo tiene una tasa de alimentación aproximada de **60 toneladas** por día, su geometría se asemeja a un cono truncado con diámetro máximo de **3 m** y mínimo de **2.8 m**, su longitud es **9 m**. Tiene un revestimiento compuesto por ladrillos refractarios y la alimentación de material se hace de forma manual, combinando capas de piedra caliza y carbón.



Figura 4. Alimentación en horno vertical industrial.

Debido al alto compromiso de recursos involucrados en el funcionamiento de un horno industrial (materia prima, combustible, personal, etc.) se consideró poco apropiado, de inicio, plantear pruebas en este tipo de equipos. Para el desarrollo del proyecto propuesto por la estudiante Mosquera, se propuso la construcción de un equipo a escala que sirviera como herramienta experimental.

Se consultó información sobre el diseño y funcionamiento de hornos, referentes teóricos reportados en este proyecto, y se encontró que el horno a evaluar, no cumple con las especificaciones de diseño encontradas [8,9]. Ante esta situación, funcionarios de las instituciones involucradas acordaron realizar el diseño manteniendo la escala dimensional con el horno de alta producción, buscando representatividad en los resultados que se obtuvieran a pequeña escala.



Figura 5. Horno vertical piloto.

El equipo fue construido y puesto en funcionamiento. Las referencias del diseño planteado se reporta en el Anexo 1 de este proyecto.

El diagrama del proceso de obtención de oxido e hidróxido de calcio se muestra a continuación:

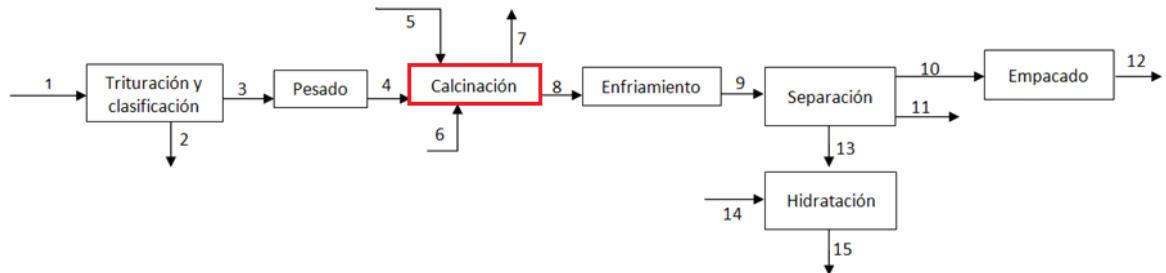


Figura 6. Diagrama de proceso.

- | | |
|------------------------|-------------------------|
| 1. Piedra caliza | 9. Cal enfriada |
| 2. Material descartado | 10. Cal a distribución |
| 3. Piedra fraccionada | 11. Residuos |
| 4. Material a procesar | 12. Producto empacado |
| 5. Combustible | 13. Cal a hidratación |
| 6. Aire | 14. Agua |
| 7. Gases de combustión | 15. Hidróxido de Calcio |
| 8. Óxido de Calcio | |

6. Desarrollo

En general, un horno horizontal rotatorio para calcinación de calizas está compuesto de la siguiente manera [4, 5, 6]:

- **Cilindro rotatorio:** Estructura tubular metálica con pared refractaria donde se lleva a cabo el proceso de disociación del Carbonato de Calcio. Debe soportar los esfuerzos estructurales generados por el peso del material refractario y el de la piedra caliza que se desplaza en su interior mientras gira a la velocidad de funcionamiento determinada; debe estar inclinado respecto al eje horizontal. Por uno de sus extremos se carga la piedra caliza a procesar y por el otro se entrega la energía térmica requerida, usualmente a través de un quemador, y se realiza la descarga del material procesado.
- **Apoyos y soporte estructural:** El cilindro rotatorio debe tener pistas de rodadura, que permitan su desplazamiento angular con bajos valores de fricción por contacto rodante. Además, la estructura debe soportar las reacciones generadas en las pistas y tener la rigidez suficiente para garantizar el posicionamiento del equipo en estado de reposo, en arranque y operando a plena carga.
- **Accionamiento y transmisión:** El equipo debe estar en condiciones de operar de manera estable a la velocidad de rotación que se determine, para ello debe contar con un accionamiento que entregue la potencia suficiente para vencer la inercia del equipo incluso en situaciones de arranque con carga. Se debe contar también con una transmisión que ajuste la velocidad de rotación del accionamiento a un valor determinado de funcionamiento. El eje de salida de la transmisión debe ir acoplado al cilindro rotatorio del horno.
- **Quemador:** La correcta selección del equipo quemador es fundamental para garantizar una distribución térmica uniforme que optimice el proceso de calcinación y un bajo consumo de combustible (Impacto económico y ambiental). Se pueden instalar sistemas de tiro inducido o forzado de aire, siempre que el sistema de chimenea instalado en la boca de alimentación de material garantice el tiro natural de los gases de combustión dentro del equipo.

- **Alimentación y descarga:** Se debe proporcionar un sistema de alimentación de piedra caliza que permita regular el flujo de material en función de las condiciones operativas del horno. Además, un sistema de descarga y enfriamiento para el material procesado.

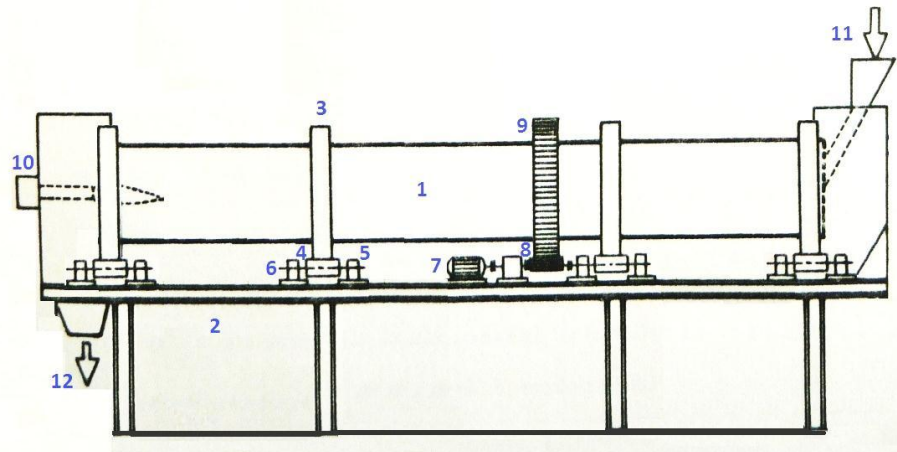


Figura 7. Horno rotatorio horizontal [3].

- | | |
|-------------------------|-------------------|
| 1 – Horno rotatorio | 7 – Motorreductor |
| 2 – Soporte estructural | 8 – Piñón |
| 3 – Pistas de rodadura | 9 – Corona |
| 4 – Rodillos | 10 – Quemador |
| 5 – Rodamientos | 11 – Alimentación |
| 6 – Ejes de rodillos | 12 – Descarga |

Como estrategia para desarrollar el diseño básico del equipo dando cumplimiento a los objetivos planteados, se dividió en 3 partes el desarrollo del proyecto: componentes estructurales, análisis térmico, y funcionamiento y control.

En la Figura 8 se muestra un diagrama de desarrollo aplicable al diseño de hornos rotatorios en general.

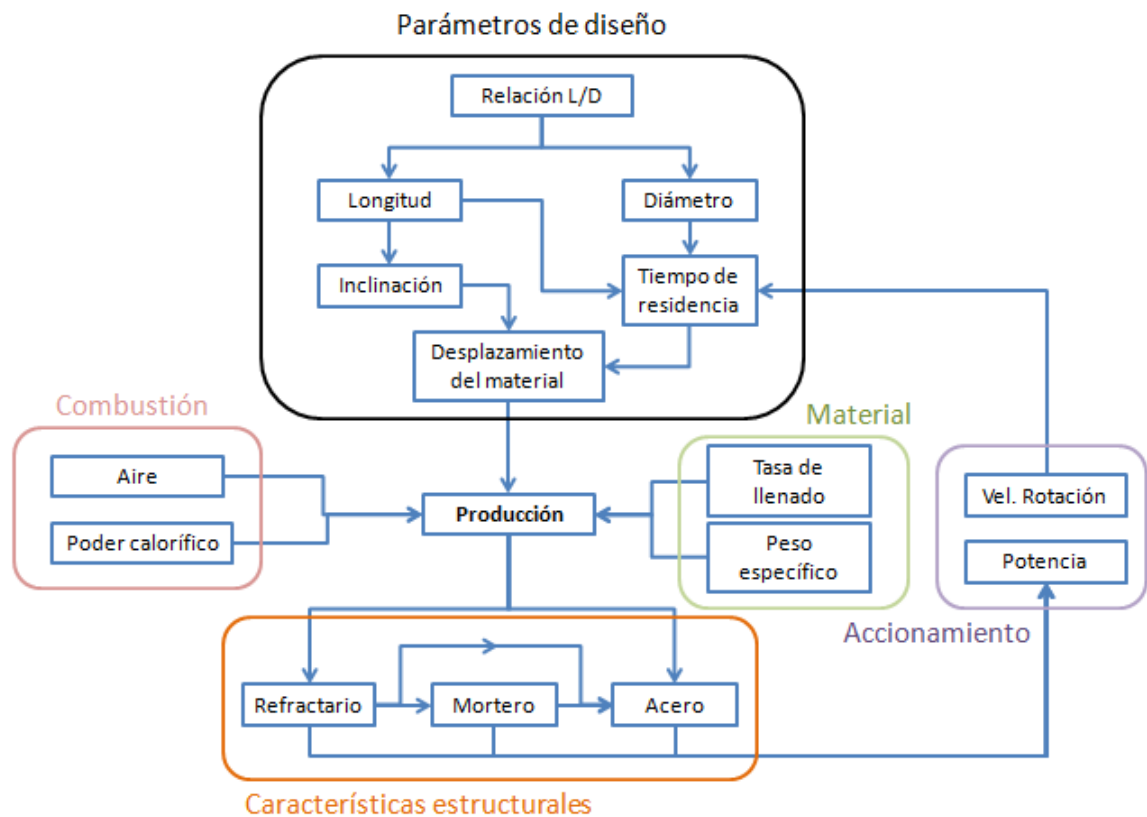


Figura 8. Diagrama de desarrollo del diseño.

6.1 Componentes estructurales

Con base en la documentación recolectada sobre equipos de calcinación de calizas y tomando como referencia el diseño, fabricación y montaje experimental realizado con el horno vertical piloto, se establecieron los parámetros de diseño a tener en cuenta en el dimensionamiento del horno horizontal rotatorio.

A continuación se referencian dichos parámetros:

- Relación dimensional L/D
 - Longitud
 - Diámetro útil
- Inclinación

- Velocidad de rotación
- Tiempo de residencia de material
- Desplazamiento del material
- Producción estimada

Se desarrolló una hoja de cálculo con los parámetros de referencia sugeridos y los utilizados para este proyecto, con el fin de facilitar el modelado de hornos rotatorios cambiando las variables de diseño.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1										
2										
3										
4										
5										
6										
7										
8										
9										
10										
11										
12										
13										
14										
15										
16										
17										
18										
19										
20										
21										
22										
23										
24										
25										
26										
27										
28										
29										
30										
31										
32										
33										
34										
35										
36										
37										
38										

Dimensiones - Equipo		Lamina de Acero A36	
Díametro útil	0,60 m	Espesor	6,35 mm
Relación L/D	20	Largo	12000 mm
Longitud	12,00 m	Ancho	3321 mm
Área útil	0,28274 m²	Densidad	7860 kg/m³
Volumen	3,39 m³	Volumen	0,25 m³
Díametro Exterior (no incluye espesor)	1,0572 m	Masa	1989,23 kg
Espesor refractario	0,23 m		

Piedra Caliza		Pistas de Rodadura	
Densidad	2800,00 kg/m³	Número de pistas	4
Llenado	10,0 %	Ancho	0,1 m
Área ocupada	0,028 m²	Díametro Interno	1,0572 m
Volumen ocupado	0,34 m³	Díametro Externo	1,2572 m
Masa	950,02 kg	Área	0,364 m²
		Volumen	0,036 m³
		Densidad	7850 kg/m³
		Masa	114153 kg

Gases de Combustión - Aire		Ladrillo refractario	
Densidad	1,14 kg/m³	Largo	9,00 in
Presencia	90,0 %	Ancho	4,50 in
Volumen	3,05 m³	Alto	2,50 in
Masa	3,48 kg	Volumen	101,25 in³
		Densidad	2820,00 kg/m³
		Volumen total refractario	7,14 m³
		Masa total refractario	20137,31 kg
		Cantidad aprox. ladrillos	4304

Cargas sobre la estructura del equipo		Mortero	
Piedra Caliza	9319,67 N	Tipo 1	205 kg/1000 ladrillos
Acero	30712,751 N	Tipo 2	320 kg/1000 ladrillos
Refractario	197546,98 N	Tipo 1	123,55 kg/m² de ladrillo
Mortero	8655,24 N	Tipo 2	192,87 kg/m² de ladrillo
Gases/Aire	34,15 N	Masa Tipo 1	882,29 kg
Total	246268,79 N	Masa Tipo 2	1377,23 kg

Carga distribuida - Viga		Carga distribuida - mediocilindro	
	20522,4 N/m		12358,1 N/m²

Figura 9. Hoja de cálculo. Módulo: Dimensionamiento.

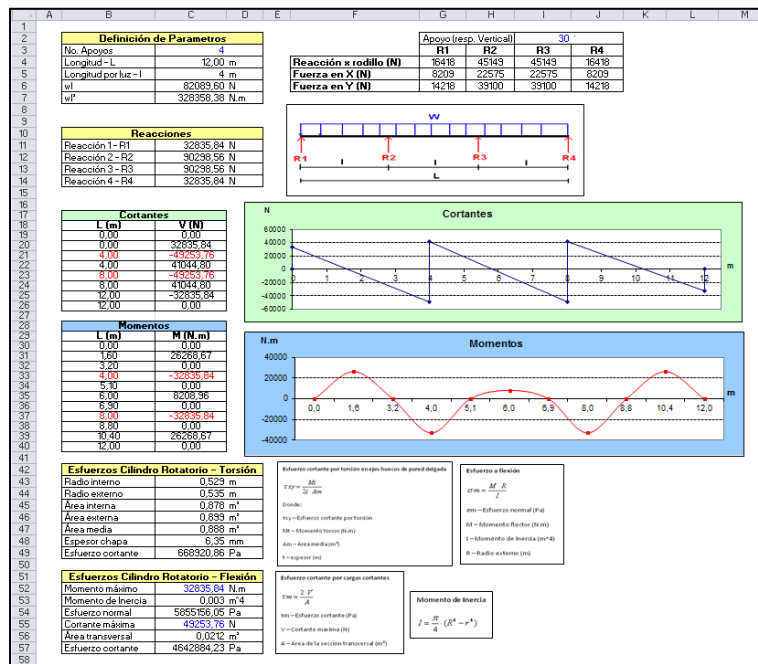


Figura 10. Hoja de cálculo. Módulo: Cargas.

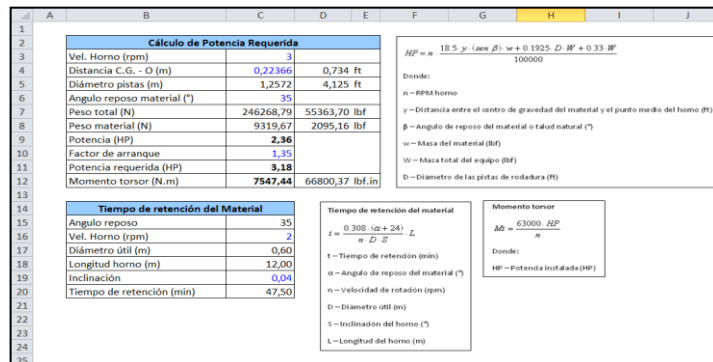


Figura 11. Hoja de cálculo. Módulo: Componentes.

6.1.1 Geometría y dimensionamiento

Un aspecto fundamental en el diseño de hornos para procesamiento de calizas, es la relación geométrica entre el diámetro útil (D) y la longitud del equipo (L). En documentos de referencia [10,12,13], catálogos de empresas fabricantes de este tipo de hornos [14,15,16,17], trabajos de grado sobre equipos para procesamiento de calizas [3,4,5]; se encontró que la relación L/D puede variar entre 10 y valores

superiores a 30. Como parámetro del diseño a desarrollar se determinó una relación L/D igual a **20**, valor intermedio entre el rango de referencias encontrado.

Por restricciones constructivas el diámetro útil del equipo debe permitir el trabajo de una persona en su interior para la colocación del refractario, tomando en consideración la experiencia en la construcción del horno piloto vertical se determinó que el diámetro interior del equipo rotatorio es **60 cm** y considerando la relación L/D establecida la longitud del equipo quedó definida en **12 m**.

La inclinación del eje de rotación del horno respecto al eje horizontal varía en función de la longitud entre 2 y 6 cm/m [18]. Se determinó la inclinación de diseño en **4 cm/m**, de donde se obtiene un ángulo entre el cilindro rotatorio y el eje horizontal de aproximadamente **2.29°**. El diseño contempla la opción implementar un mecanismo que permita desplazamientos verticales en uno de los extremos del horno para variar la inclinación del mismo.

La velocidad de rotación del horno es un parámetro importante para determinar la capacidad de producción del mismo y el tiempo de residencia del material en su interior, se optó por seleccionar un equipo de transmisión variable, que permita operar el equipo en 3 valores de velocidad de rotación: alto, medio y bajo [18]. Como parámetro de diseño se fijó un rango de operación entre **1 y 3 rpm**.

En la Tabla 2 se reportan las características básicas del equipo.

Tabla 2. Parámetros de diseño.

Relación L/D	20	-
Diámetro útil	0,6	m
Longitud	12	m
Area útil	0,283	m ²
Volumen total	3,393	m ³
Velocidad rotación	1 - 2 - 3	rpm
Tasa de llenado	10	%
Inclinación	4,0	%

Para calcular el tiempo estimado de residencia del material dentro del horno se utilizó la siguiente expresión [18]:

$$\theta = \frac{0.19 \cdot L}{N \cdot D \cdot S} \quad (1)$$

Donde:

θ – Tiempo de paso (min)

L – Longitud del horno (m)

N – Velocidad rotacional (rpm)

D – Diámetro útil del horno (m)

S – Inclinación del horno (%)

Para determinar la tasa de alimentación aproximada requerida por el equipo se tomó como referencia la siguiente expresión [18]:

$$P = \frac{f \cdot \rho \cdot v \cdot D^2}{2.12} \quad (2)$$

Donde:

P – Tasa de alimentación de material (t/h)

f – Tasa de llenado del horno (%)

ρ – Peso específico del material (t/m³)

D – Diámetro útil del horno (m)

v – Desplazamiento del material en el interior del horno (m/min)

Los resultados obtenidos para el porcentaje de llenado propuesto (**10%**) y un peso específico de **1.4 t/m³**, se reportan en la Tabla 3.

Tabla 3. Condiciones operativas del horno.

Velocidad de rotación (rpm)	1	2	3
Tiempo de residencia (min)	95	47,5	31,67
Desplazamiento (m/min)	0,126	0,253	0,379
Tasa de alimentación (t/h)	0,30	0,60	0,90

Para determinar las dimensiones externas del cilindro rotatorio, se utilizó la longitud típica de un ladrillo (**9 in**) como referencia para el espesor de refractario,

valor (**22.86 cm**) por encima de la referencia [12] mínima sugerida (**15 cm**). En la sección 5.2.6 de este documento se evaluó el fenómeno de transferencia de calor para dicho espesor.

En el proceso de instalación del revestimiento refractario es necesaria la utilización de mortero, pensando en el espacio ocupado por dicho material entre las juntas de los ladrillos y en la parte externa del mismo para la fijación con la chapa, se estableció el diámetro externo del cilindro rotatorio en **1.07 m (42 1/8 in)**.

En la Figura 12 se muestra una vista frontal de la estructura rotatoria, donde se pueden apreciar sus principales dimensiones, la distribución de los ladrillos refractarios y la posición de los rodillos de apoyo.

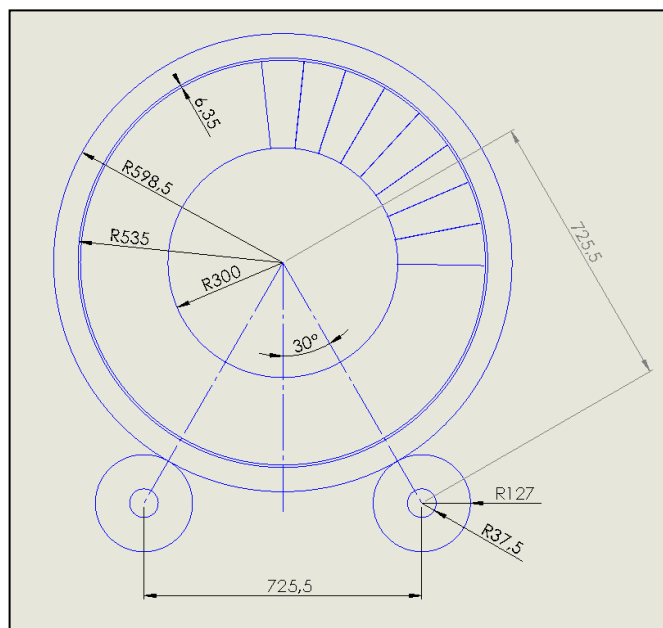


Figura 12. Vista frontal del cilindro. Unidades: milímetros (mm).

En la Figura 13 se muestra una vista lateral donde se referencia la longitud total del equipo, la inclinación respecto al eje horizontal y la distribución de los rodillos de apoyo.

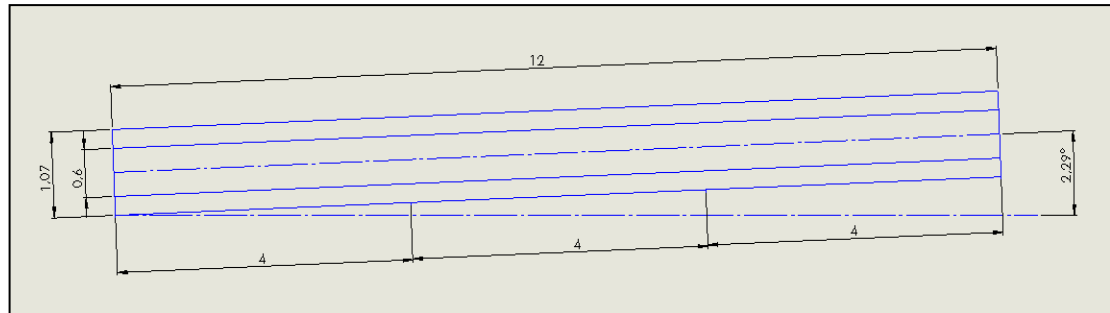


Figura 13. Vista lateral del cilindro. Unidades: metros (m).

6.1.2 Análisis estructural

Una vez determinadas las dimensiones básicas del equipo, se evaluó la robustez estructural del mismo. Se planteó un análisis simplificado del estado de cargas, asumiendo el cilindro rotatorio como una viga de múltiples apoyos (viga continua). El cilindro metálico visto como viga continua es soportado por 4 apoyos, distribuidos como muestra la Figura 14.

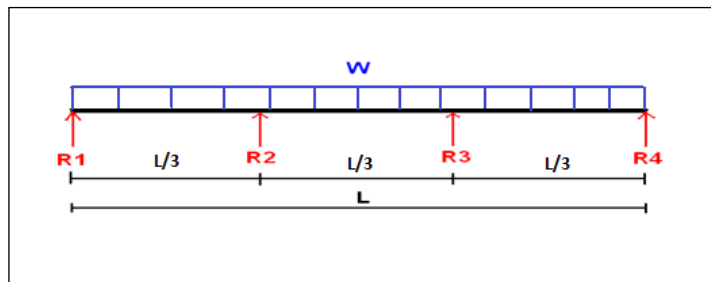


Figura 14. Viga continua de 4 apoyos con carga distribuida.

Las cargas resultantes se determinaron en la hoja de cálculo desarrollada, bajo el siguiente escenario:

Tabla 4. Determinación de cargas sobre la estructura cilíndrica.

Lamina de Acero A36		
Espesor	6.35	mm
Volumen	0.253	m ³
Densidad	7860	kg/m ³
Masa	1989	kg
Pistas de Rodadura		
Numero de pistas	4	
Ancho	0.0762	m
Espesor	0.0635	m
Díametro Interno	1.070	m
Díametro Externo	1.197	m
Volumen	0.017	m ³
Densidad	7860	kg/m ³
Masa	542	kg
Piedra Caliza		
Densidad	2200	kg/m ³
Llenado	20	%
Volumen ocupado	0.679	m ³
Masa	1493	kg
Mezcla de gases de combustión y aire		
Presencia	80.0	%
Volumen	2.71	m ³
Densidad	1.14	kg/m ³
Masa	3	kg
Ladrillo refractario		
Longitud	22.86	cm
Volumen x ladrillo	1659.2	cm ³
Densidad	2600	kg/m ³
Volumen total	7.141	m ³
Cantidad aprox. ladrillos	4304	unidades
Masa total refractario	18566	kg
Mortero		
Tipo 1	0.205	kg/ladrillo
Tipo 2	0.32	kg/ladrillo
Masa (Tipo 1)	882	kg
Masa (Tipo 2)	1377	kg

Se plantearon condiciones operativas críticas tomando los valores más altos de densidad encontrados para piedra caliza y ladrillo refractario, se incrementó la tasa de llenado del equipo al doble del valor fijado como parámetro de diseño y se seleccionó el tipo de mortero que requiere mayor cantidad según el número de ladrillos a instalar.

Se determinó entonces que la carga total sobre el cilindro rotatorio es **23970 kg**.

6.1.3 Momentos y cortantes

En la Figura 15 se muestran gráficamente los diagramas de momentos y cortantes para una viga de cuatro apoyos con carga distribuida w y 3 luces iguales de longitud l .

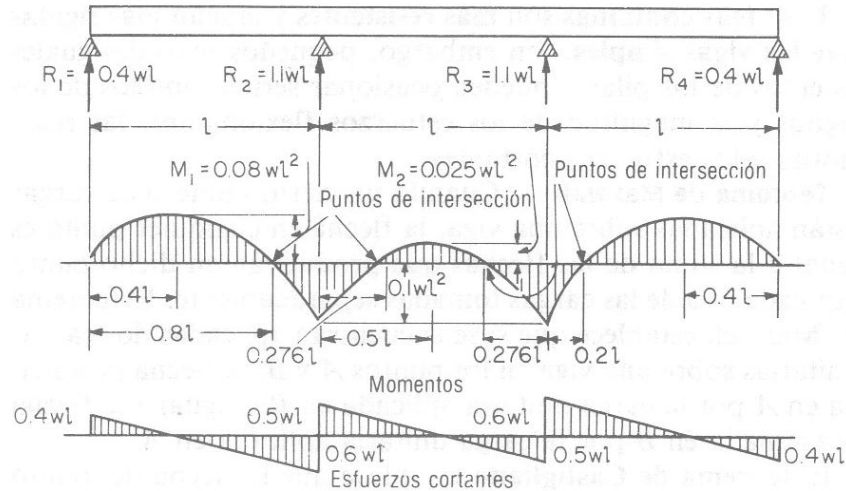


Figura 15. Diagrama de momentos y cortantes [19].

Con el valor de la carga w igual a **19595.5 N/m** y longitud de cada luz l de **4 m**, se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 5. Magnitud de reacciones, momentos y cortantes.

R1	31353	N
R2	86222	N
R3	86222	N
R4	31353	N
Cortante máx.	39192	N
	-47030	N
Momento máx.	25083	N.m
	-31353	N.m

6.1.4 Momento torsor

Para determinar el momento torsor aplicado a la estructura cilíndrica, se debe calcular la potencia de accionamiento para hacer rotar el horno a la velocidad de operación requerida. Se determinó dicha potencia con la siguiente expresión (12.59 [18]):

$$HP = N \cdot \frac{18.85 \cdot y \cdot (\sin \beta) \cdot w + 0.1925 \cdot D \cdot W + 0.33 \cdot W}{100000} \quad (3)$$

Donde:

HP – Potencia requerida

N – Velocidad rotacional (rpm)

y – Distancia entre centro del horno y centro de gravedad del lecho de material (ft)

β – Angulo de reposo del material o talud natural (°)

w – Carga viva - material (lbf)

W – Carga rotatoria total (lbf)

D – Diámetro del anillo en asiento – pistas de rodadura (ft)

Se obtuvo que para una velocidad máxima de rotación del equipo de **3 rpm**, la magnitud de potencia requerida es **2.51 HP**. Teniendo en cuenta la clasificación de la *National Electrical Manufacturers Association – NEMA* [20], reportada en la Tabla 6, se aplicó un factor de arranque de 1.5 al valor obtenido. Con lo que se determinó una potencia aproximada de arranque de **3.76 HP**.

Tabla 6. Clasificación NEMA para motores comerciales [20].

Clase NEMA	Par de arranque Carr/Cn	Corriente de Arranque	Regulación de Velocidad (%)	Nombre de clase del motor
A	1.5-1.75	5-7	2-4	Normal
B	1.4-1.6	4.5-5	3.5	De propósito general
C	2-2.5	3.5-5	4-5	De doble jaula alto par
D	2.5-3.0	3-8	5-8 , 8-13	De alto par alta resistencia
F	1.25	2-4	mayor de 5	De doble jaula, bajo par y baja corriente de arranque.

Para calcular el momento torsor (Mt) se utilizó la siguiente expresión:

$$Mt = \frac{63000 \cdot HP}{N} \quad (4)$$

Se determinó con los valores de potencia obtenidos que el momento torsor en operación es **5945.7 N.m**. Para un escenario supuesto de arranque bajo carga se obtuvo **8918.6 N.m**.

6.1.5 Chapa metálica

Se propuso un espesor de chapa para el cilindro rotatorio de $\frac{1}{4}$ de pulgada (**6.35 mm**) de acero estructural ASTM-A36. Dicha chapa debe soportar los esfuerzos generados por el peso total del equipo, resultante de la suma de acero, refractario, mortero y material en proceso; y el momento torsor por efecto del accionamiento acoplado.

Los esfuerzos simples, definidos por teorías de flexión y torsión, se hallan en planos normales o paralelos a la línea de acción de las fuerzas. Sin embargo, los esfuerzos normales, así como los cortantes, pueden generarse en otras direcciones.

Para determinar el esfuerzo cortante máximo por torsión sobre la chapa metálica, se tomó dicha chapa como un eje hueco de pared delgada y se utilizó la siguiente expresión [21]:

$$\tau_{xy} = \frac{Mt}{2t \cdot Am} \quad (5)$$

Donde:

τ_{xy} – Esfuerzo cortante por torsión (Pa)

Mt – Momento torsor (N.m)

Am – Área media del eje (m²)

t – Espesor de chapa (m)

Se obtuvo un esfuerzo cortante máximo por torsión de **790.45 kPa**.

Para calcular los esfuerzos normales por flexión en la chapa se utilizó la expresión (6).

$$\sigma_m = \frac{M \cdot R}{I} \quad (6)$$

Donde:

σ_m – Esfuerzo normal (Pa)

M – Momento flector (N.m)

I – Momento de Inercia (m⁴)

R – Radio máximo (m)

El momento de inercia de la geometría se obtiene de:

$$I = \frac{\pi}{4} \cdot (R^4 - r^4) \quad (7)$$

El valor máximo por flexión se calculó utilizando la magnitud máxima del diagrama de momentos (Tabla 4). Esfuerzo normal máximo igual a **5.59 MPa**.

Se determinó también la magnitud de esfuerzos cortantes generados por las cargas flectoras, se utilizó la siguiente expresión:

$$\tau_m = \frac{2 \cdot V}{A} \quad (8)$$

Donde:

τ_m – Esfuerzo cortante (Pa)

V – Componente cortante máxima (N)

A – Área de la sección transversal (m²)

La magnitud obtenida para dicho esfuerzo es **4.43 MPa**.

Se analizó el estado de cargas de la sección central de la estructura cilíndrica, donde se combinan los esfuerzos cortantes generados por el momento torsor y los normales generados por flexión.

$$\sigma'_m = \sqrt{\sigma_{xm}^2 + 3 \cdot \tau_{xym}^2} \quad (9)$$

$$\sigma'_a = \sqrt{\sigma_{xa}^2 + 3 \cdot \tau_{xya}^2} \quad (10)$$

$$\sigma_{xm} = \frac{\sigma_{x \max} + \sigma_{x \min}}{2} \quad \sigma_{xa} = \frac{\sigma_{x \max} - \sigma_{x \min}}{2} \quad (11) \quad (12)$$

$$\tau_{xym} = \frac{\tau_{xy \max} + \tau_{xy \min}}{2} \quad \tau_{xya} = \frac{\tau_{xy \max} - \tau_{xy \min}}{2} \quad (13) \quad (14)$$

Se calculó un equivalente de esfuerzos combinados según el criterio de Von Mises, obteniendo la magnitud de esfuerzos medios y alternantes.

$$\sigma'_m = 1.37 \text{ MPa} \quad \sigma'_a = 5.59 \text{ MPa}$$

Se realizó un análisis de fatiga [22], calculando el límite de resistencia a la fatiga con la siguiente expresión:

$$S_e = K_a \cdot K_b \cdot K_c \cdot K_d \cdot K_e \cdot K_f \cdot S_e' \quad (15)$$

Se utilizaron los siguientes factores:

S_u – Esfuerzo ultimo. Acero ASTM-A36 = 400 MPa

K_a – Factor de acabado superficial. Laminado en caliente = 0.74

K_b – Factor de tamaño. Diámetro ≥ 10 in = 0.60

K_c – Factor de carga. Flexión-torsión = 0.70

K_d – Factor de temperatura. Temperatura $\leq 450^\circ\text{C}$ = 1.00

K_e – Factor de confiabilidad. Confiabilidad 99% = 0.81

K_f – Factor de concentración de esfuerzos. Sin cambios de sección = 1.00

S_e' – Límite de resistencia. Si $S_u \leq 1460$ MPa entonces $S_e' = 0.504 S_u$

Remplazando se obtuvo:

$$S_e = 50.75 \text{ MPa}$$

Se calculó el factor de seguridad de Goodman modificado para esfuerzos fluctuantes con el límite de resistencia a fatiga obtenido, utilizando la expresión (16).

$$FS = \frac{1}{\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_u}} \quad (16)$$

Remplazando se obtuvo:

$$FS = 8.8$$

El factor de seguridad encontrado sugiere que el espesor de chapa seleccionado ofrece la suficiente robustez estructural para el estado de cargas evaluado.

6.1.6 Pistas de rodadura

Al cilindro se le debe soldar una pista externa de rodadura por cada apoyo. Estos están compuestos por 2 rodillos ubicados a un ángulo de 30° respecto al eje vertical buscando reducir la magnitud de las reacciones laterales en la estructura que se generan cuando dicho ángulo se aproxima a 45°.

De observaciones realizadas en equipos de filtrado de bagacillo (filtro Trommel) de Ingenios azucareros de la región, se plantea las siguientes dimensiones para las pistas de rodadura:

Espesor = 6.35 cm (2 ½ in)

Longitud de pista = 7.62 cm (3 in)

Dichas dimensiones se evaluaron asumiendo media pista como una viga curva empotrada en uno de sus extremos como muestra la Figura 16.

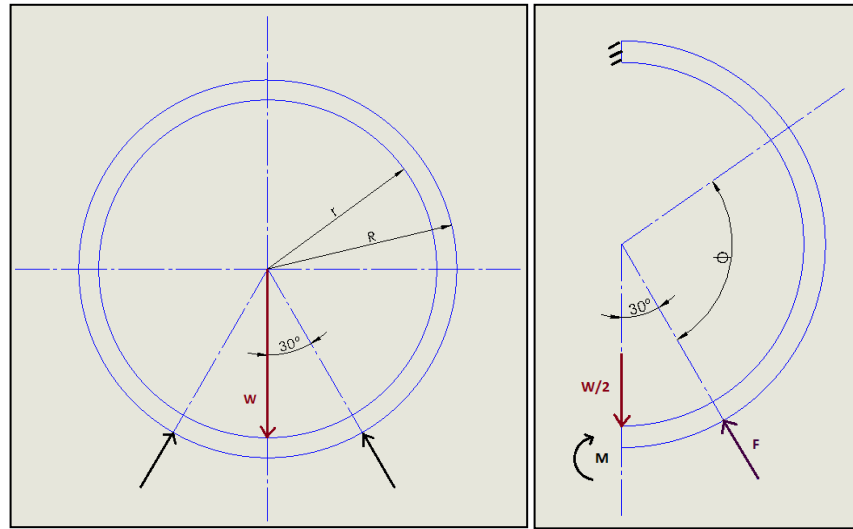


Figura 16. Cargas sobre pistas de rodadura.

Según el teorema de Castigliano, se planteó lo siguiente:

$$\phi = \frac{\delta U}{\delta M} \quad (17)$$

Donde:

ϕ – Deformación angular

U – Energía del sistema

M – Momento flector

Se asume que el momento flector es el único causante de la energía de deformación.

Por la simetría geométrica de la viga curva planteada, se asume que en el punto donde se aplica el momento, no se presentan deformaciones ($\phi = 0$).

Se resolvió para los siguientes valores:

$$R = 0.5985 \text{ m} \quad (D = 47 \frac{1}{8} \text{ in})$$

$$r = 0.535 \text{ m} \quad (d = 42 \frac{1}{8} \text{ in})$$

6.1.7 Rodillos de apoyo

El dimensionamiento de los rodillos a utilizar en cada apoyo se realizó partiendo del supuesto que entre menor sea el diámetro de los mismos, van a presentar una mayor tasa de desgaste y una mayor probabilidad de falla por fatiga debido a un numero mas elevado de ciclos bajo condiciones iguales de funcionamiento. La longitud del rodillo debe ser superior a la seleccionada para las pistas de rodadura.

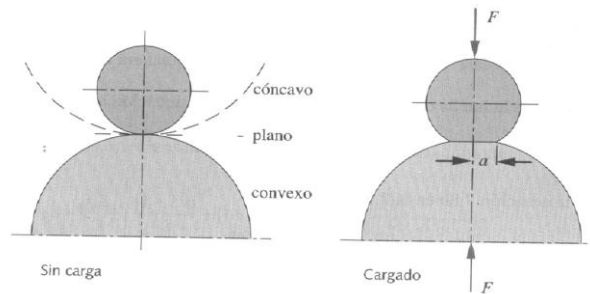


Figura 17. Contacto cilíndrico [22].

Para calcular el ancho de la superficie en contacto con las pistas de rodadura, se asumió que la velocidad de rotación es lo suficientemente baja para considerarlo un problema con cargas estáticas y se utilizaron las siguientes expresiones:

$$a = \sqrt{\frac{2}{\pi} \cdot \frac{m_1 + m_2}{B} \cdot \frac{F}{L}} \quad (18)$$

$$m_1 = \frac{1 - \vartheta_1^2}{E_1} \quad m_2 = \frac{1 - \vartheta_2^2}{E_2} \quad (19)$$

$$B = \frac{1}{D_1} + \frac{1}{D_2} \quad (20)$$

Donde:

a – Ancho medio del perímetro rectangular del área de contacto (m)

L – Longitud a lo largo del eje del cilindro (m)

F – Carga total de contacto (N)

ϑ – Coeficiente de Poisson

E – Módulo de elasticidad (Pa)

D – Diámetro (m)

Se resolvió para la reacción máxima obtenida por rodillo (**43111 N**), utilizando el par tribológico acero – hierro fundido (ASTM A36 – ASTM A47). Las propiedades utilizadas de dichos materiales y las dimensiones de pistas y rodillos se reportan a continuación:

Tabla 7. Características de pistas y rodillos.

	Pistas	Rodillos
Material	Acero ASTM-A36	Hierro fundido ASTM-A47
Modulo de elasticidad (GPa)	200	165
Coeficiente de Poisson	0,29	0,27
Diámetro (m)	1,197 (47 1/8 in)	0,254 (10 in)
Longitud (m)	0,0762 (3 in)	0,1016 (4 in)

Se obtuvo un valor de ancho medio de contacto (a) igual a **0.887 mm**. Con dicho valor se realizaron los siguientes cálculos:

$$P_{max} = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot a \cdot L} \quad (21)$$

$$\sigma_{x\ max} = \sigma_{z\ max} = -P_{max} \quad (22)$$

$$\sigma_{y\ max} = -2 \cdot \nu \cdot P_{max} \quad (23)$$

$$\tau_{max} = 0.304 \cdot P_{max} \quad (24)$$

La magnitud de los esfuerzos obtenidos y el valor del factor de seguridad para cada componente se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8. Esfuerzos y factor de seguridad en rodillos.

	Esfuerzo generado (MPa)	Resistencia ultima (MPa)	Factor de seguridad
Compresión	359,64	620	1,72
Cortante	109,33	330	3,02

Las dimensiones propuestas y materiales seleccionados satisfacen las condiciones de carga bajo el escenario crítico planteado. Se dejó un margen de 1 pulgada (**2.54 cm**) en la longitud de los rodillos para tolerar los desplazamientos axiales por dilatación térmica de la estructura cilíndrica.

6.1.8 Ejes de rodillos

Cada rodillo debe estar apoyado sobre 2 rodamientos y un eje central. El dimensionamiento de dicho eje se realizó teniendo en cuenta las cargas flectoras fluctuantes que transmite cada rodillo.

El estado de cargas planteado se muestra en la Figura 18.

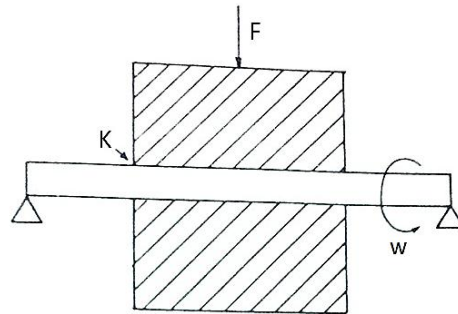


Figura 18. Carga sobre eje de rodillo.

Se planteó inicialmente una longitud de eje entre apoyos de **12 cm** sometido a una carga de **43111 N**. Se asume que se presentan altas probabilidades de falla en los puntos (K) donde se acopla el rodillo al eje.

Se calcularon los esfuerzos debido al momento flector generado por la carga aplicada, valor tomado de la reacción por rodillo del peso total del cilindro metálico. Se utilizaron las expresiones (6), (7), (10) y (12) para determinar la magnitud del esfuerzo alternante un eje circular sólido de diámetro **75 mm**.

Se obtuvo un esfuerzo de **31.23 MPa** con un momento máximo de **1293.33 N.m**.

Se realizó un análisis de fatiga utilizando la expresión (15) y los siguientes factores:

S_u – Esfuerzo ultimo. Acero SAE 1020 HR = 379 MPa

K_a – Factor de acabado superficial. Laminado en caliente = 0.74

K_b – Factor de tamaño. Diámetro ≤ 10 in = 0.80

K_c – Factor de carga. Flexión-torsión = 0.70

K_d – Factor de temperatura. Temperatura $\leq 450^\circ\text{C}$ = 1.00

K_e – Factor de confiabilidad. Confiabilidad 99.9% = 0.75

K_f – Factor de concentración de esfuerzos. Sin cambios de sección = 1.00

S_e' – Limite de resistencia. Si $S_u \leq 1460$ MPa entonces $S_e' = 0.504 S_u$

Resolviendo se obtuvo un limite de resistencia a fatiga (S_e) de **59.36 MPa**.

Utilizando la expresión (16) se calculó el factor de seguridad para los ejes de rodillos.

$$\text{FS} = 1.90$$

6.1.9 Rodamientos

Para la instalación de cada rodillo se requieren 2 rodamientos de soporte. Para seleccionarlos se tuvieron en cuenta las cargas máximas generadas sobre cada rodillo. Se utilizó un manual del fabricante de rodamientos SKF [23] para determinar el tipo de rodamiento adecuado y el modelo a reportar como referencia.

El diámetro de referencia es el encontrado en el punto anterior para los ejes de rodillos (**75 mm**).

Se seleccionó un rodamiento de rodillos a rótula, sobre manguito de fijación.

Referencia: **SKF 22217 EK + H 317**

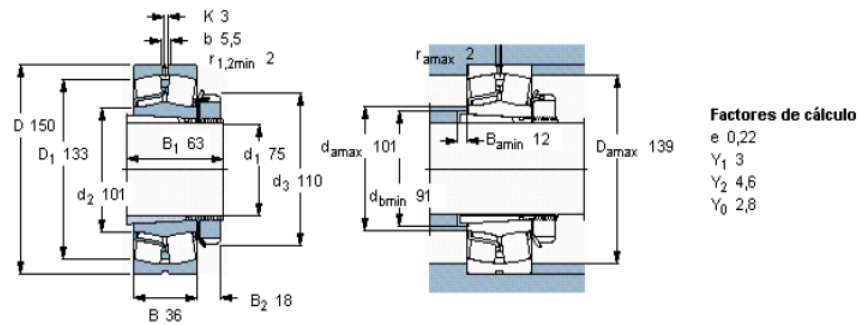


Figura 19. Rodamiento SKF 22217EK+H317 [23].

Como soporte para el rodamiento se seleccionó un soporte de pie de dos piezas para rodamientos sobre manguito de fijación, con obturación estándar.

Referencia: **SKF FSNL 517**

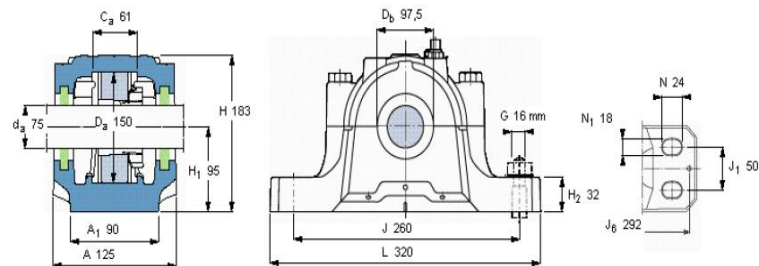


Figura 20. Soporte de dos piezas SKF FSNL 517 [23].

Adicionalmente se realizó la selección de una unidad de rodamiento de rodillos con soporte de pie que podría utilizarse para cumplir la función de los 2 productos escogidos previamente.

Referencia: **SKF SYNT 75 LTF**

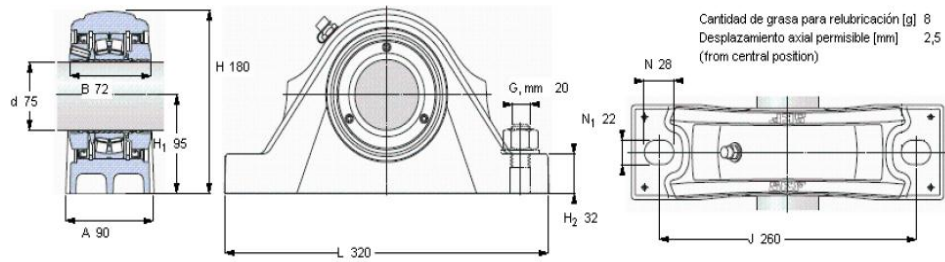


Figura 21. Unidad de rodamiento con soporte SKF SYNT 75 LTF [23].

Para determinar la capacidad de carga requerida en los rodamientos se utilizaron las siguientes expresiones [24]:

$$C_r = \frac{P(L_{10} \cdot N)^{1/K}}{Z} \quad (25)$$

$$L_{10} = \frac{16700}{N} \cdot \left(\frac{C}{P}\right)^K \quad (26)$$

$$P = X \cdot R + Y \cdot T \quad (27)$$

Donde:

C_r – Capacidad requerida (N)

P – Carga radial equivalente (N)

P_o – Carga estática equivalente (N)

L_{10} – Vida nominal (h)

N – Velocidad de rotación (rpm)

K – Constante. Rodamientos de bolas = 3. Rodamientos de rodillos = 10/3.

Z – Constante. Rodamientos de bolas = 25.6. Rodamientos de rodillos = 18.5.

R – Carga radial (N)

T – Carga de empuje – axial (N)

X – Factor radial. Ver Figura 11.

Y – Factor de empuje. Ver Figura 11.

Se plantearon 3 escenarios posibles de carga variando el ángulo de inclinación de la estructura cilíndrica.

Tabla 9. Cargas radial y de empuje por rodamiento.

Reacción por rodillo (N)	43111		
Carga en rodamiento (N)	21555,5		
Inclinación (°)	0,00	2,29	5,00
Carga de empuje (N)	0,0	861,3	1878,7
Carga radial (N)	21555,5	21538,3	21473,5

Utilizando los mayores valores de carga obtenidos, para una inclinación de 5°, se determinaron la vida nominal del rodamiento y los valores de carga radial y carga estática equivalentes, a través de una herramienta de cálculo [25] del fabricante SKF.



Cargas equivalentes y vida nominal

Se ha tenido el máximo cuidado para garantizar la exactitud de este cálculo, pero no se acepta ninguna responsabilidad por pérdidas o daños, ya sean directos, indirectos o consecuentes, que se produzcan como resultado del uso de dicho cálculo.

Véase la sección "Carga dinámica equivalente del rodamiento"

Véase la sección "Carga estática equivalente"

Rodamiento

C [kN]

C₀ [kN]

F_r [kN]

F_a [kN]

e

X

Y

P [kN]

L₁₀ [Mrev]

X₀

Y₀

P₀ [kN]

Figura 22. Cargas equivalentes y vida nominal [23].

La capacidad requerida para el rodamiento alcanzó un valor de **87.2 kN** para el escenario de mayor carga. Comparando dicha capacidad con la carga dinámica equivalente del rodamiento (**285 kN**), se obtuvo un factor de **3.27**.

Con los diámetros de pistas y rodillos, asumiendo contacto no deslizante, se determinó que la velocidad de operación de los rodamientos es de máximo **15**

rpm. La vida nominal de referencia para el rodamiento seleccionado es **2.837.116 horas**, valor muy similar al obtenido por la herramienta de cálculo de SKF (**2.833.333 h**).

6.1.10 Rodillos de posicionamiento

Para evitar posibles desplazamientos del cilindro rotatorio por efecto del componente axial de carga resultante del ángulo de inclinación de la estructura respecto al eje horizontal y buscando mantener distribuido el peso total del equipo operando sobre los 4 apoyos (8 rodillos) propuestos, se planteó usar elementos de retención sobre las pistas de rodadura.

Se plantea la opción de utilizar como elementos de retención, rodillos de leva con eje, producto disponible en el catalogo en línea de SKF antes referenciado [23], y que consiste básicamente en rodamientos de rodillos o agujas con pista externa dimensionada para tolerar elevadas cargas radiales.

Se seleccionó el tipo de rodillos según el cálculo de carga axial máxima (**20500 N**), generada por el peso total del equipo cuando el ángulo de inclinación supuesto es **5°** y asumiendo que bajo determinadas condiciones, solo un elemento de retención debe soportar toda la carga de la estructura.

Referencia: **SKF KRV 90 PPA**

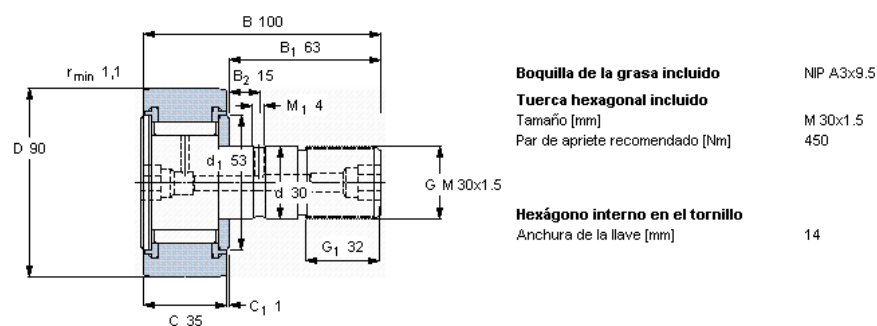


Figura 23. Rodillo de leva con eje SKF KRV90 PPA [23].

Utilizando la herramienta de cálculo de SKF, se determinó la vida nominal del rodamiento.

Cargas equivalentes y vida nominal

Se ha tenido el máximo cuidado para garantizar la exactitud de este cálculo, pero no se acepta ninguna responsabilidad por pérdidas o daños, ya sean directos, indirectos o consecuentes, que se produzcan como resultado del uso de dicho cálculo.

Véase la sección "Carga dinámica equivalente del rodamiento"

Véase la sección "Carga estática equivalente"

Rodamiento

C [kN]

C₀ [kN]

F_r [kN]

P [kN] P₀ [kN]

L₁₀ [Mrev]

Figura 24. Cargas equivalentes y vida nominal [23].

En rodamientos de agujas la capacidad requerida de selección es producto solo del componente axial de carga, para el escenario evaluado dicho valor es igual a la carga axial máxima obtenida. La capacidad de carga dinámica equivalente para el rodamiento seleccionado es **47.3 kN**, se obtuvo entonces un factor de incremento de cargas de hasta **2.31**.

Tomando el diámetro medio de las pistas de rodadura y el diámetro del rodillo de retención seleccionado, se determinó una velocidad de rotación aproximada en los rodillos de **38 rpm**, asumiendo contacto no deslizante. Utilizando la expresión (26) se calculó que la vida nominal para la referencia seleccionada es **7.133 horas**. El valor obtenido con la herramienta de SKF fue **7.017 horas**.

6.1.11 Estructura

Tomando el estado de cargas totales utilizado para el análisis y selección de componentes antes realizados, se diseñó una estructura de soporte para el cilindro rotatorio.

Se planteó una estructura compuesta por perfiles W de acero ASTM-A36 dispuestos como muestra la Figura 25.

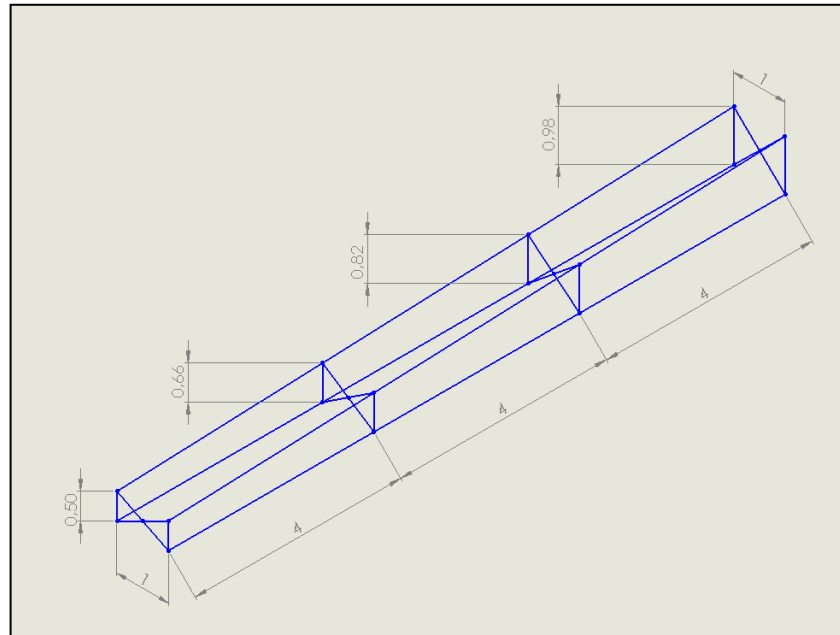


Figura 25. Vista isométrica de la estructura. Unidades: metros (m).

Utilizando el módulo estructural de la herramienta computacional de elementos finitos ANSYS¹, se evaluaron diferentes referencias de perfiles W con la geometría y dimensiones reportadas en la figura anterior.

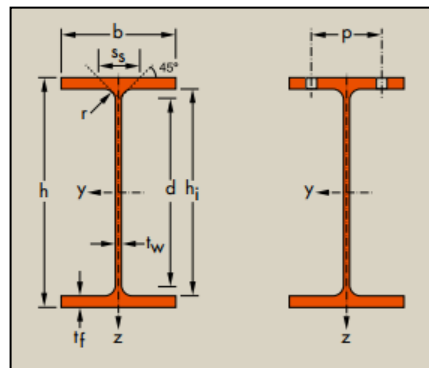


Figura 26. Sección de perfil W.

¹ Licencia de la herramienta propiedad del Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia – Cenicaña.

Se empleó el elemento tipo viga *BEAM189* (Figura 27).

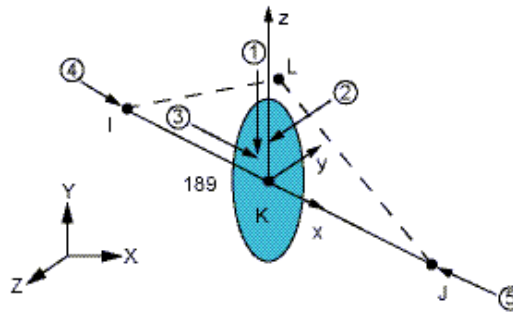


Figura 27. Elemento tipo viga *BEAM189*.

Se realizó el análisis con 3 referencias diferentes de perfil W las cuales se reportan a continuación:

Tabla 10. Referencias de perfil W evaluadas.

Denominación	Dimensiones						Dimensiones de construcción						Superficie	
G kg/m	h mm	b mm	t _w mm	t _r mm	r mm	A mm ² x10 ²	h _i mm	d mm	Ø	p _{min} mm	p _{max} mm	A _L m ² /m	A _G m ² /t	
W 100 x 100 x 19.3**	19,3	106	103	7,1	8,8	6	24,71	88,4	76,4	-	-	-	0,599	30,90
W 150 x 100 x 13.5**	13,5	150	100	4,3	5,5	6	17,29	139,0	127,0	-	-	-	0,681	50,19
W 150 x 100 x 18.0**	18,0	153	102	5,8	7,1	6	22,84	138,4	126,4	-	-	-	0,692	38,60

En la Figura 28 se muestra la orientación dada a los perfiles evaluados y la malla generada.

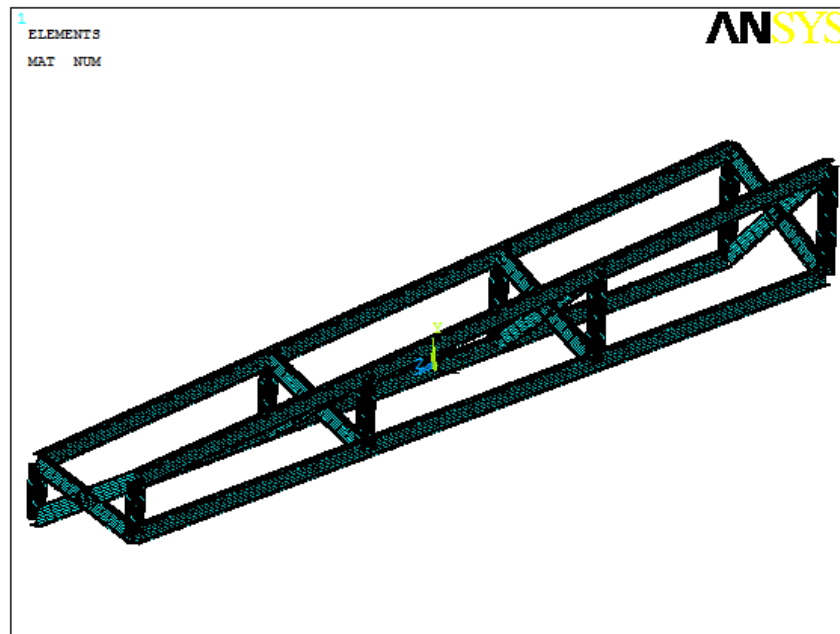


Figura 28. Malla de la estructura evaluada.

En la Tabla 11 se reportan los resultados obtenidos.

Tabla 11. Esfuerzo y deformaciones estructurales.

Perfil		W150x13,5	W150x18,0	W100x19.3
Tase de llenado del horno (%)		20		
R1 - R4	Carga x Rodillo (N)	15677		
	Componente en X - Fx(N)	7839		
	Componente en Y - Fy(N)	13577		
R2 - R3	Carga x Rodillo (N)	43111		
	Componente en X - Fx(N)	21556		
	Componente en Y - Fy(N)	37335		
Esfuerzo máximo* (MPa)		47,8	36,2	33,2
Deformación máxima (mm)		0,316	0,238	0,218
Numero de nodos		1950	2062	2142
* Esfuerzo combinado de Von Mises				
R1 - R4: Apoyos en los extremos de la estructura				
R2 - R3 : Apoyos internos				

El esfuerzo máximo se localizó en la base inferior de las vigas verticales de la estructura como se muestra en la Figura 29, Figura 30 y Figura 31 para cada referencia de perfil W utilizada.

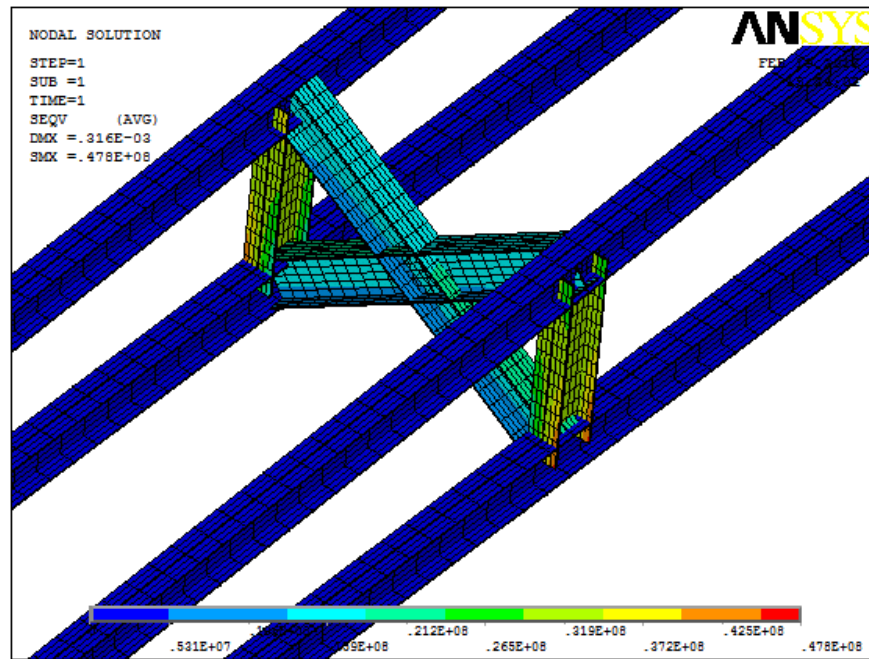


Figura 29. Esfuerzos combinados. Perfil W150x13.5. Unidades: Pascales (Pa).

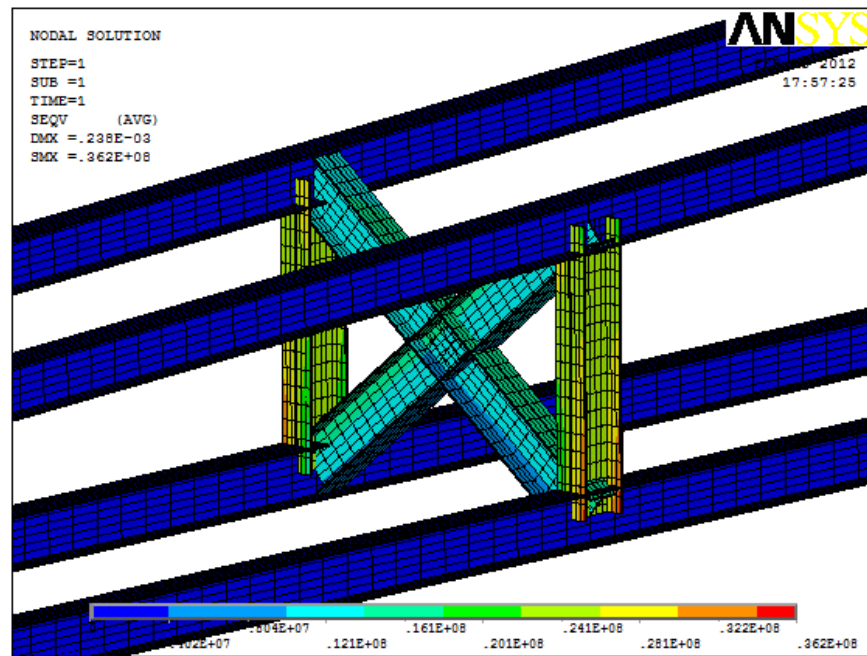


Figura 30. Esfuerzos combinados. Perfil W150x18.0. Unidades: Pascales (Pa).

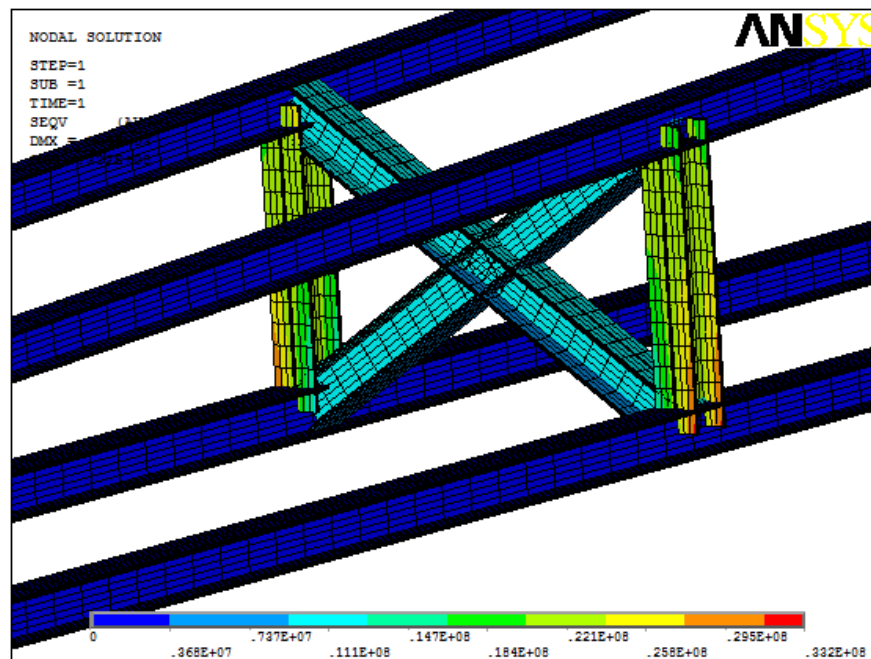


Figura 31. Esfuerzos combinados. Perfil W100x19.3. Unidades: Pascales (Pa).

Los resultados de esfuerzos combinados de Von Mises y deformaciones estructurales obtenidos del análisis realizado con elementos finitos, fueron validados para diferentes números de nodos. Por el tipo de elemento utilizado se alcanzó independencia de malla con todos los modelos evaluados.

En la Tabla 12 se muestra que no se presentó variación alguna en los resultados obtenidos con distintos enmallados.

Tabla 12. Independencia de malla.

No. Nodos	σ (MPa)	δ (mm)	Variación σ	Variación δ
232	36,2	0,238	-	-
1378	36,2	0,238	0	0
2142	36,2	0,238	0	0
16205	36,2	0,238	0	0

De las referencias de perfil W evaluadas, la que menor valor de masa por unidad de longitud presenta es la **W150x13.5**. Aunque con el perfil **W100x19.3** se obtiene una reducción del 30% de los esfuerzos generados sobre la estructura, la masa total aproximada de la misma aumenta de **863 kg** a **1234 kg**.

El perfil **W150x13.5** se reporta entonces como el de referencia para la estructura de soporte del cilindro rotatorio, presentando un factor de seguridad bajo el estado de cargas planteado de **5.23**.

6.2 Análisis térmico

El proceso de calcinación de calizas requiere una cantidad determinada de energía para alcanzar la temperatura y presión de disociación del carbonato de calcio. Las reacciones químicas y físicas que se dan en el interior del horno rotatorio son endotérmicas, su funcionamiento requiere un importante aporte calórico. Dicho aporte es suministrado generalmente por un proceso de combustión. La energía térmica total que entra al sistema producto del flujo másico y el poder calorífico del combustible, está expuesta a 3 fenómenos de transferencia de calor:

- **Conducción.** Se transfiere energía calórica entre el equipo y el material en proceso a través de las paredes del ladrillo refractario.
- **Convección.** Se transfiere calor entre los gases de combustión y la caliza.
- **Radiación.** Se presenta un intercambio energético entre: los gases y la caliza, entre los gases y las paredes del refractario, y entre el material y la superficie refractaria. La chapa metálica del horno transfiere calor al medio ambiente por convección y radiación.

6.2.1 Refractario

Es de gran importancia la función del revestimiento refractario en este tipo de equipos, y en general, en procesos que involucran fenómenos termodinámicos. De su capacidad de restringir el flujo de calor hacia el exterior del horno depende la eficiencia térmica del equipo durante el proceso de calcinación. Esto implica además, evitar la exposición de la chapa metálica a altas temperaturas.

- **Propiedades mecánicas:** Los ladrillos refractarios deben tener propiedades mecánicas que permitan absorber las cargas que se generan con el equipo en operación, ya sea por posibles deformaciones estructurales de la chapa metálica o por las dilataciones que se generan producto de grandes cambios de temperatura. Además, deben tener buena resistencia al desgaste superficial generado por el material en movimiento.
- **Propiedades químicas:** Sus propiedades químicas deben garantizar que los ladrillos sean inertes tanto al material que se procesa, como a los gases de combustión que se generan. Deben presentar también estabilidad ante grandes cambios de temperatura cuando se realizan de manera instantánea.
- **Propiedades térmicas:** Debe presentar buenas propiedades como aislante térmico con una baja conductividad. Se deben minimizar las pérdidas de calor por el área superficial del horno.

En la Figura 32 se muestra el tipo de ladrillos refractario sugerido por cada zona térmica de un horno rotatorio horizontal para producción de cemento. Aunque las

temperaturas reportadas son mas elevadas que la requerida para el procesamiento de calizas, el tipo de ladrillo refractario coincide con referencias encontradas [12,13,18].

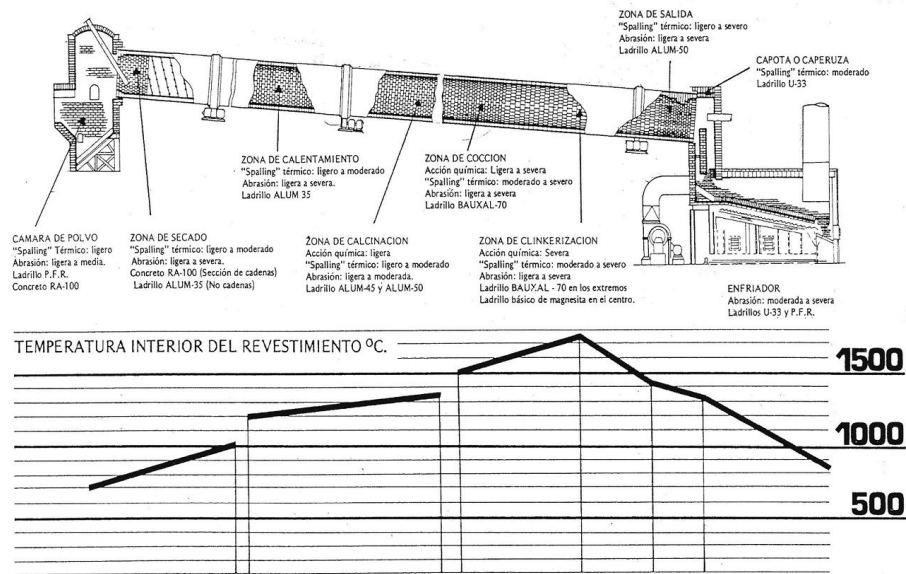


Figura 32. Distribución térmica y tipo de refractario [30].

Se seleccionó para la instalación del revestimiento refractario ladrillo de longitud estándar (**9 in**) en las siguientes referencias [30]:

- Referencia: **ALUM50**

Zona de precalentamiento y enfriamiento.

Clasificación: NTC-773, ASTM C-27

Composición: Alúmina (Al_2O_3) – 50%

Cono paramétrico equivalente (PCE) = 35

Densidad: $2.16 - 2.26 \text{ g/cm}^3$

- Referencia: **BAUXAL70**

Zona de calcinación

Clasificación: NTC-773, ASTM C-27

Composición: Alúmina (Al_2O_3) – 70%

Cono paramétrico equivalente (PCE) > 37

Densidad: $2.46 - 2.56 \text{ g/cm}^3$

6.2.2 Balance energético

Para realizar análisis energético del proceso de calcinación se debe realizar primero el balance de la reacción de disociación del carbonato de calcio [12].



Teniendo en cuenta los pesos moleculares de los reactivos y de los productos se obtiene la relación mostrada a continuación:



Se concluyó que idealmente por cada 100 kg de CaCO_3 se producen 56 kg de CaO y 44 kg de CO_2 .

Para la realización del balance energético se asumieron condiciones de estado estable y se consideraron pérdidas por transferencia de calor por conducción, convección y radiación. En la Figura 33 se puede observar como determinada cantidad del valor calórico producto de la combustión, se disipa, disminuyendo calor útil disponible de disociación, necesario para la producción de óxido de calcio.

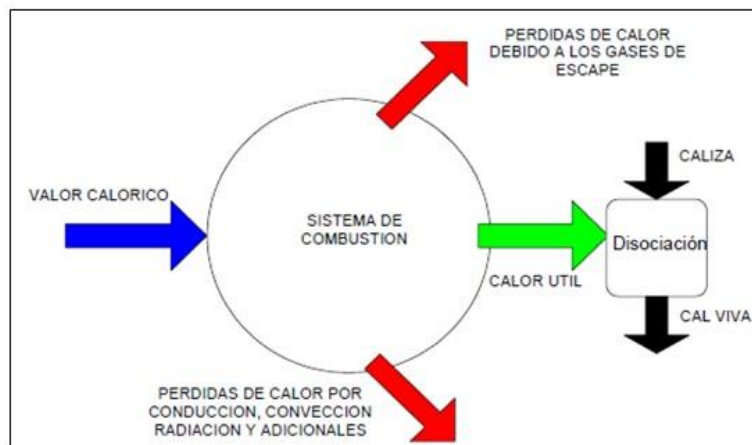


Figura 33. Flujo energético del proceso [30].

Para obtener el calor que permite la disociación de la piedra caliza se utilizó la expresión (30).

$$Q_{dis} = \sum X_i \times h_{prod} - \sum X_i \times h_{react} \quad (30)$$

Donde:

Q_{dis} – Energía de disociación de la piedra caliza.

X_i – Numero de moles.

h – Entalpía de formación de los productos. (Tabla 13)

H – Entalpía de formación de los reactivos. (Tabla 13)

Los valores de entalpía de formación utilizados se reportan en la Tabla 13.

Tabla 13. Entalpías de formación [30].

Compuesto	Entalpías de formación (Kcal/mol)
Carbonato de calcio - CaCO_3	-289,50
Dióxido de carbono - CO_2	-94,05
Oxidos de calcio - CaO	-151,70

Resolviendo se obtuvo el siguiente valor:

$$Q_{dis} = 43.746 \frac{\text{kcal}}{\text{mol}}$$

Remplazando en la expresión (28):



Con los valores obtenidos se determinó la mínima cantidad de energía requerida para la disociación de la piedra caliza en relación con los kilogramos de cal producida obtenidos de la expresión (29).

$$Q = \frac{Q_{dis}}{\text{kg cal/mol}} \quad (31)$$

Se resolvió para **0.056 kg/mol**.

$$Q = 781.18 \frac{kcal}{kg \text{ cal}}$$

Se realizó conversión de unidades para obtener:

$$Q = 3269.86 \frac{kJ}{kg \text{ cal}}$$

Este valor de energía necesaria la disociación de caliza o carbonato de calcio obtenido, se puede comparar con registros teóricos reportados [12].

Tabla 14. Requerimientos energéticos de referencia.

Proceso	Distribución (%)	Energía (kJ/kg)
Calor de disociación	91,4	2875
Calor para secar la piedra	1,5	47
Calor perdido en cenizas e inquemados	1,6	50
Radiación	1,3	41
Perdidas de calor por gases de escape	3,1	97
Calor sensible perdido en descarga de cal	1,1	35
TOTAL	100	3145

Se comparó el calor de disociación referencia (**2875 kJ/kg**) con el valor obtenido del desarrollo de las ecuaciones (**3269.86 kJ/kg**), se decidió seguir con los cálculos teniendo en cuenta el requerimiento energético mas alto, es decir el valor obtenido del análisis químico realizado.

Otro aspecto importante que se puede observar en la Tabla 14, es que del total de energía requerida reportada, el 91.4% lo aporta el proceso de disociación, es decir una muy alta eficiencia térmica producto de bajas pérdidas por transferencias de calor, poco material incocido y/o requemado, y alimentación de piedra caliza con baja humedad.

6.2.3 Tipo de combustible

La elección de un combustible apropiado es de gran importancia para el proceso de obtención de óxido de calcio. Aunque la mayoría de los combustibles pueden ser utilizados de una u otra manera, es recomendable hacer un balance entre costo del combustible y eficiencia. Actualmente combustibles como madera y carbón no son muy utilizados industrialmente, se utiliza en su mayoría gas natural o *fuel oil*, ya que son combustibles más eficientes y generalmente más fáciles de manejar y distribuir. Otra de las ventajas de este tipo de combustibles es que su quema no produce cenizas, de manera que la cal no va a tener contaminaciones por este concepto y no requiere de un espacio destinado para depositar residuos de combustión.

Para el desarrollo de este proyecto se tomó la decisión de utilizar gas natural como combustible para el proceso de calcinación. Sus principales componentes son: Metano (CH_4) y Etano (C_2H_6), otros hidrocarburos más pesados como Propano (C_3H_8) y Butano (C_4H_{10}), están presentes también en el gas natural en cantidades porcentuales más pequeñas. Tabla 15.

Tabla 15. Composición típica del gas natural en Colombia [32].

Constituyente	Fórmula química	Composición por volumen (%)
Metano	CH_4	81.86
Etano	C_2H_6	11.61
Propano	C_3H_8	1.92
I-Butano	C_4H_{10}	0.23
N-Butano	C_4H_{10}	0.22
Nitrógeno	N_2	0.90
Dióxido de carbono	CO_2	3.18

También es importante tener en cuenta que una de las condiciones básicas para lograr el mejor aprovechamiento del combustible es generar condiciones apropiadas para un correcto proceso de combustión. Se debe suministrar un flujo adecuado de aire y con ello de oxígeno para ser combinado con el carbono, el hidrógeno y en dado caso el azufre del combustible.

6.2.4 Aire para combustión

La cantidad mínima de aire necesaria para la combustión completa de un combustible recibe el nombre de aire estequiométrico o teórico, un proceso de combustión con menos cantidad teórica de aire está condenado a ser incompleto. Por esta razón en los procesos de combustión reales, es una práctica muy común emplear más aire que la cantidad estequiometría, con el fin de aumentar las oportunidades de obtener una combustión completa. La cantidad de aire en exceso respecto a la cantidad estequiométrica se conoce como exceso de aire, y dependiendo del combustible se encuentran ciertos valores de referencia. No se debe incrementar de manera desmesurada el exceso de aire utilizado pues puede generar caídas drásticas en la temperatura de llama [33].

Se toman como referencia 2 figuras de un artículo [33] de profesores de la Universidad de Pamplona, España, donde se realizaron pruebas con quemadores de gas natural variando la cantidad de exceso de aire suministrada. Dichas figuras y un párrafo contenido en el documento se muestran a continuación:

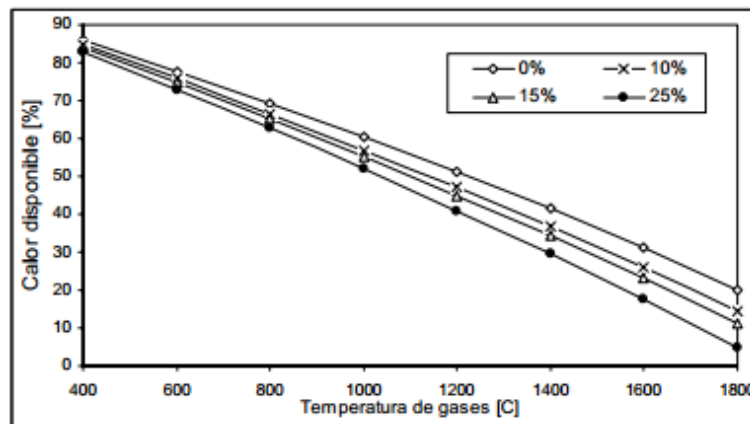


Figura 34. Variación del exceso de aire en combustión [33].

Nombre en referencia: *“Porcentaje de calor disponible respecto al poder calorífico superior como función de la temperatura de los gases de combustión y el exceso de aire”*.

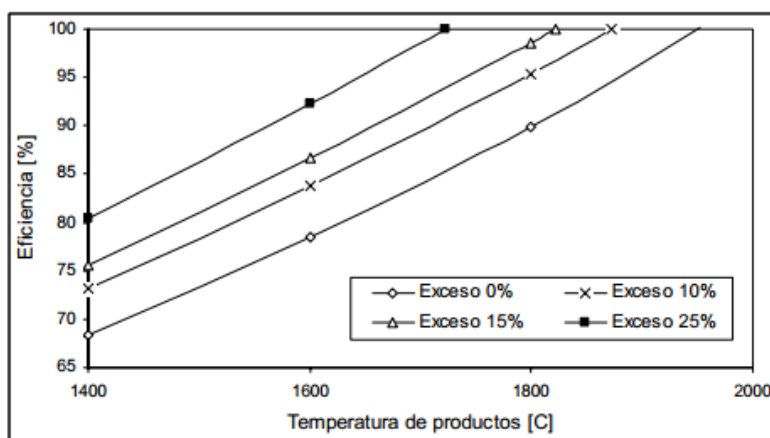
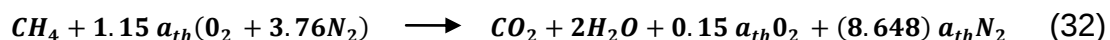


Figura 35. Eficiencia de combustión.

Nombre en referencia: “Eficiencia de combustión vs temperatura de productos y exceso de aire”.

“Los quemadores industriales suelen operarse con un exceso de aire del 15% con el fin de minimizar riesgos ante posibles gases inquemados. Utilizar mayores excesos sería desfavorable energéticamente y emplear excesos muy bajos conllevaría a tener mezclas poco íntimas de aire y combustible con la consecuente generación de inquemados y de riesgos asociados a los inquemados combustibles”².

Para el análisis realizado de combustión de gas natural se utilizó un exceso del 15% de aire. Se determinó la relación aire combustible, asumiendo que la combustión es completa y que los gases de combustión son ideales. Los productos de combustión contienen CO₂, H₂O, N₂ y algunas cantidades de O₂. La expresión de combustión para metano se muestra en la ecuación (32).



Donde a_{th} es el coeficiente estequiométrico para el aire. Teniendo en cuenta el 15% de exceso de aire, se utiliza el factor de $1.15 a_{th}$. La cantidad estequiométrica de oxígeno $a_{th}O_2$ se utiliza para oxidar el combustible, y la cantidad de exceso

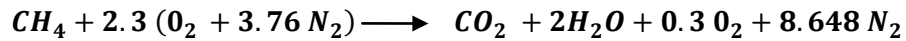
² SERRANO J. y CARRANZA Y. Análisis teórico de la combustión en quemadores de gas natural. Universidad de Pamplona. Scientia et Technica Año XI, No. 29, Diciembre de 2005.

restante $0.15 a_{th} O_2$ aparecerá en los productos como oxígeno no utilizado. Para calcular el coeficiente a_{th} se balancearon las cantidades de O_2 .

$$O_2: 1.15 a_{th} = 1 + 1 + 0.15 a_{th}$$

$$a_{th} = 2$$

Sustituyendo,



Para determinar la relación aire combustible se utilizó la expresión (33).

$$AC = \frac{m_{aire}}{m_{combustible}} \quad (33)$$

$$m_{aire} = 2.3 \cdot (2 \cdot O + 3.76 \cdot 2 \cdot N) \quad (34)$$

$$m_{combustible} = C + 4 \cdot H \quad (35)$$

Donde:

O – Peso molecular del oxígeno = 16 g/mol

N – Peso molecular del nitrógeno = 14 g/mol

C – Peso molecular del carbono = 12 g/mol

H – Peso molecular del hidrógeno = 1 g/mol

Remplazando en las expresiones (34) y (35), se obtuvo:

$$AC = 19.734 \frac{kg_{aire}}{kg_{combustible}}$$

Es decir, se deben suministrar **19.734** unidades másicas de aire por cada unidad másica de combustible para el proceso de combustión con 15% de exceso de aire.

6.2.5 Consumo de combustible

Para el cálculo de la cantidad necesaria de combustible para las tasas estimadas de producción, se tomaron valores de referencia de la eficiencia térmica de hornos rotatorios.

Según BOYTON [13] la eficiencia térmica de un horno rotatorio estándar es de **32.5%** y para un horno con recuperador térmico de **46.9%**.

Se realizaron los cálculos correspondientes para cada valor de eficiencia tomando las tasas de alimentación de caliza definidas (Tabla 3).

La expresión que determina la eficiencia térmica de un horno rotatorio es:

$$n = \frac{Q_{dis}}{PC \cdot m_c} \quad (36)$$

Donde:

n – Eficiencia térmica

Q_{dis} – Energía de disociación (kJ/kg)

PC – Poder calorífico del combustible (kJ/kg)

m_c – Cantidad de combustible (kg)

Como los valores de eficiencia ya están establecidos, se obtuvo la cantidad de combustible necesaria para una tasa de alimentación de material de **0.3, 0.6 y 0.9 t/h**. Se despejó la variable m_c de la expresión (36). Los resultados se muestran a continuación:

Tabla 16. Requerimiento energético.

Alimentación (kg/h)		300	600	900
Energía de disociación (kJ/kg)		3269,9		
Poder calorífico (kJ/kg)		55528		
Energía total requerida (kJ/h)	32,5%	3018332	6036665	9054997
	46,9%	2091595	4183190	6274785
Consumo de combustible (kg/h)	32,5%	54,4	108,7	163,1
	46,9%	37,7	75,3	113,0

En la Tabla 16 se puede observar claramente como el horno con recuperador cuya eficiencia es mayor, consume menos combustible bajo el mismo escenario.

6.2.6 Transferencia de calor

En hornos rotatorios, el material en proceso no se dispersa por la corriente de aire, sino que se retiene en la parte inferior del cilindro. La transmisión de calor se produce por radiación y convección del gas en movimiento hacia el ladrillo del horno y la superficie expuesta del lecho, y por radiación del ladrillo al lecho. Para unidades que utilizan cámaras de combustión por separado, se supone que, a temperaturas elevadas, la resistencia de la película de pared a la transmisión de calor por convección del gas al ladrillo es limitante y que, en cualquier punto del lecho la temperatura es muy semejante a la de la pared. Por tanto el área eficaz de transmisión de calor es igual a la superficie interna del horno [18].

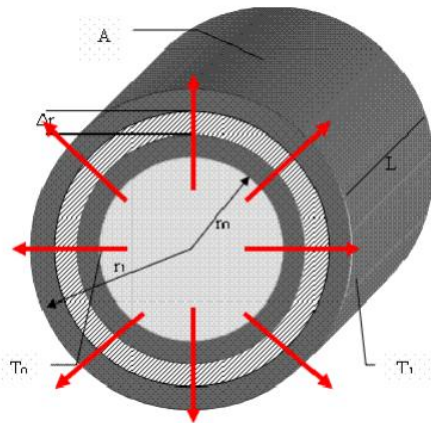


Figura 36. Transferencia de calor en cilindro hueco [34].

Se realizó el cálculo del coeficiente de transferencia de calor por convección entre los gases de combustión y el ladrillo refractario utilizando la expresión (37) [18].

$$U_s = 23,7 \cdot G^{0,67} \quad (37)$$

Donde:

U_s – Coeficiente de transferencia de calor por convección ($J/ m^2.s.K$)

G – Caudal másico de gas por sección transversal de horno ($kg/s.m^2$)

Los coeficientes de transferencia de calor por convección obtenidos con los valores de flujo másico de combustible de la Tabla 16, se reportan a continuación:

Tabla 17. Coeficiente de transferencia de calor por convección.

Alimentación (kg/h)		300	600	900
Consumo de combustible (kg/h)	32,5%	54,4	108,7	163,1
	46,9%	37,7	75,3	113,0
Coeficiente de transferencia (W/m ² .K)	32,5%	18,33	29,16	38,26
	46,9%	14,33	22,81	29,93

Se consideró el equipo operando en estado estacionario y bajo la premisa que la energía térmica que se disipa por la superficie del horno (convección) es igual a la cantidad de calor que ha logrado atravesar el ladrillo refractario del horno (conducción). Es decir:

$$Q_{convección} = Q_{conducción} \quad (38)$$

$$Q_{convección} = h \cdot A \cdot \Delta T_1 \quad (39)$$

$$Q_{conducción} = - \frac{2\pi \cdot K \cdot L \cdot \Delta T_2}{\ln \frac{r_1}{r_0}} \quad (40)$$

Donde:

h – Coeficiente de transferencia de calor (W/m².K)

A – Área superficial de transferencia de calor (m²)

K – Coeficiente de conductividad térmica (W/m.K)

L – Longitud del horno (m)

r_1 – Radio externo del cilindro rotatorio (m)

r_0 – Radio interno del cilindro rotatorio (m)

ΔT – Diferencia de temperaturas (K)

Utilizando un coeficiente de conductividad térmica de **1.5 W/m.K** para el revestimiento refractario [34], el valor promedio (**26.3 W/m².K**) de los coeficientes

de transferencia de calor reportados en la Tabla 16, una temperatura ambiente de **25°C**, una temperatura máxima de **1250°C** en el interior del cilindro rotatorio, y las características dimensionales de equipo y refractario. Se obtuvo que la temperatura máxima que llega a la chapa metálica es de **201.4°C**. Valor que se considera bajo respecto al mínimo (**450°C**) que genera reducción en el límite de resistencia a fatiga del cilindro metálico [22].

El flujo de calor para ambos fenómenos de transferencia (conducción y convección) con el escenario planteado fue **5189.89 W/m²**.

Se realizó el modelamiento del fenómeno de transferencia de calor en estado estable utilizando el módulo correspondiente de la herramienta computacional de elementos finitos ANSYS.

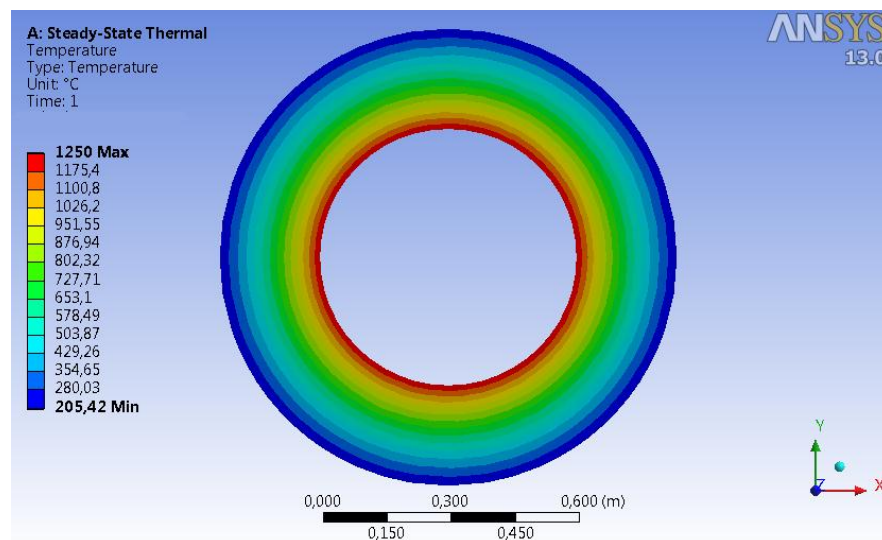


Figura 37. Variación de la temperatura en el refractario.

La temperatura obtenida en la superficie exterior del refractario con la herramienta computacional (**205.42°C**) es similar a la obtenida con las expresiones antes planteadas (**201.4°C**).

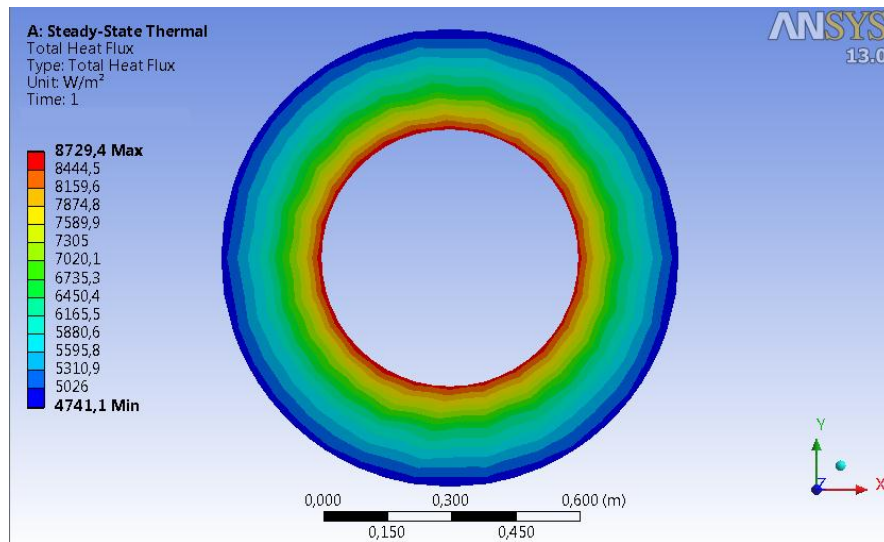


Figura 38. Flujo de calor en el refractario.

El flujo total de calor por conducción en el refractario obtenido con el análisis realizado en ANSYS fue **4741.1 W/m²**, valor **8.6%** menor que el obtenido con los cálculos realizados.

Con el valor de temperatura máxima reportada en la superficie de la chapa metálica y utilizando la expresión (41), se calculó la dilatación del acero seleccionado.

$$\frac{\Delta L}{L} = \alpha_L \Delta T \quad (41)$$

Donde:

ΔL – Delta de longitud (m)

L – Longitud del horno (m)

α_T – Coeficiente de dilatación térmica ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)

ΔT – Delta de temperatura ($^{\circ}\text{C}$)

Para acero estructural ASTM-A36 la dilatación máxima del cilindro rotatorio es **24.77 mm**, valor por debajo del rango de desplazamiento axial permitido por los rodillos de apoyo (**25.4 mm**).

6.3 Funcionamiento y control

6.3.1 Accionamiento

Se validó el valor de potencia obtenido calculando el valor requerido para vencer las fuerzas de rozamiento resultantes entre las pistas de rodadura y los rodillos de apoyo sumado a la potencia necesaria para mantener la carga total del cilindro en movimiento.

Dichos valores se obtuvieron utilizando las siguientes expresiones [26]:

$$HP = HP_1 + HP_2 \quad (42)$$

$$HP_1 = \frac{(9.2 \times 10^{-6}) \cdot W \cdot D_{eje} \cdot D_{pistas} \cdot N \cdot \mu_r}{D_{rodillos}} \quad (43)$$

$$HP_2 = (7.6 \times 10^{-4}) \cdot (\theta \cdot D_{util})^3 \cdot N \cdot L \cdot K \quad (44)$$

Donde:

HP – Potencia total requerida

HP₁ – Potencia de arranque

HP₂ – Potencia de operación

W – Carga total del equipo (lbf)

D_{eje} – Diámetro de ejes de rodillos (in)

D_{pistas} – Diámetro de pistas de rodadura (in)

D_{rodillos} – Diámetro de rodillos (in)

D_{util} – Diámetro útil del horno (ft)

L – Longitud del horno (ft)

N – Velocidad de rotación (rpm)

μ_r – Coeficiente de fricción de los rodamientos

θ – Constante = 0.79 (Figura 19.7 [26])

Remplazando para los diámetros de los componentes seleccionados, una carga total de **235150 N** (52862 lbf) y asumiendo un coeficiente de fricción de los rodamientos igual a **0.08**, se obtuvo una potencia total requerida de **1.97 HP**. Dicho valor se encuentra por debajo del anteriormente calculado (**2.51 HP**).

Utilizando el valor más alto de potencia requerida y asumiendo un factor de servicio del accionamiento de 1.5 y una eficiencia de transmisión del 80%, se realizó la siguiente selección:

Referencia: **Siemens 1LE1621-1CC2**



Figura 39. Accionamiento eléctrico SIEMENS 1LE1621-1CC2 [27].

Características [27]:º

Motor trifásico de baja tensión.

Tipo: Jaula de ardilla.

Material: Hierro fundido

Tamaño constructivo: 132M

Tensión: 220/440V

Frecuencia: 60 Hz

Numero de polos: 6

Potencia: 5 HP

Velocidad sincrónica: 1200 rpm

Rendimiento: NEMA MG1

6.3.2 Transmisión

Se requiere una reducción en la velocidad de salida del accionamiento seleccionado, para operar el horno en el rango de rotación definido. Para ello es necesario pasar de las **1200 rpm** nominales que entrega el motor a valores de entre **1 y 3 rpm**.

La transmisión de potencia entre el eje de accionamiento y el horno se hace a través de un par de engranajes rectos según lo reportado por MONTES y PEREA en la sección 2.4 de su trabajo de grado [8].

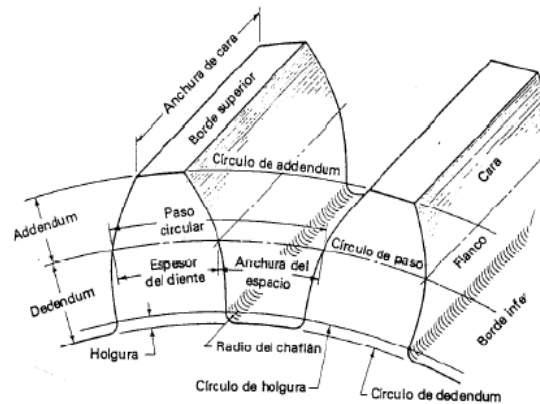


Figura 40. Engranaje de dientes rectos [35].

Se realizaron los siguientes cálculos dimensionales para el conjunto piñón-corona.

$$P = 2 \cdot \frac{180^\circ}{Z} \quad (45)$$

$$D_i = D_p - (2m \cdot 1.25) \quad (48)$$

$$m = \frac{D_e}{Z+2} \quad (46)$$

$$h = 2.25 \cdot m \quad (49)$$

$$D_p = Z \cdot m \quad (47)$$

$$L = 10 \cdot m \quad (50)$$

Donde:

P – Paso

D_p – Diámetro primitivo (mm)

Z – Numero de dientes

D_i – Diámetro interno (mm)

m – Módulo

h – Altura de diente (mm)

D_e – Diámetro exterior (mm)

L – Ancho de cara (mm)

Utilizando un módulo (m) igual a **8**, un ángulo de presión de **14.5°** y estableciendo el diámetro interno de la corona **54 mm** mayor que el diámetro externo del cilindro rotatorio, se obtuvo la siguiente configuración:

Tabla 18. Características conjunto piñón-corona.

	Corona	Piñon
M	8	8
Z	143	28
P	2,517	12,857
Di (mm)	1124,0	204,0
Dp (mm)	1144,0	224,0
De (mm)	1160,0	240,0
h (mm)	18,0	18,0
L (mm)	80,0	80,0

La configuración genera una relación de transmisión aproximada de 5.11:1. Por lo que el accionamiento acoplado debe entregar al piñón una velocidad de rotación de entre **5.11** y **15.33 rpm**.

El *ratio* de reducción entre la velocidad nominal del motor eléctrico seleccionado y la que se debe suministrar al piñón debe variar entre **78:1** y **235:1**.

6.3.3 Variador

Los variadores de velocidad son dispositivos que permiten variar la velocidad en un motor controlando electrónicamente el voltaje y la frecuencia entregada al motor, manteniendo el torque constante hasta alcanzar su velocidad nominal. Se deben conocer las especificaciones del motor para la correcta selección del variador. Las principales características a tener en cuenta son:

- Corriente máxima. Se debe tener en cuenta el factor de servicio del equipo
- Voltaje nominal.
- Frecuencia nominal.

Debe haber compatibilidad entre el motor y el variador a seleccionar. Además se debe tener conocimiento sobre las cargas de trabajo, estas pueden ser:

- Torque constante: consumo invariante con la velocidad.
- Torque variable: mayor velocidad = mayor torque = mayor consumo.
- Torque proporcional: relación directa entre velocidad y torque.
- Potencia constante: menor velocidad = mayor torque.

Si se presentan temperaturas elevadas (mayores a 50°C), problemas de ventilación, humedad, vibración u otro tipo de condiciones adversas de funcionamiento se debe realizar un ajuste de la potencia nominal reportada en la placa del equipo.



Figura 41. Variador para accionamiento eléctrico.

Respecto a la alimentación eléctrica del equipo se debe tener en cuenta que es recomendable la instalación de inductancias que sirvan como filtro a la entrada del variador, esto con el fin de evitar cargas sensibles adyacentes y la generación de armónicos. Si la aplicación del producto requiere frenado instantáneo del motor, se deben instalar unidades de frenado dinámico para ello [27].

6.3.4 Instrumentación

Es fundamental cuando se habla de optimización en un proceso productivo controlar las variables involucradas en el mismo. Para ello se debe tener un registro de las mismas que permita evaluar el comportamiento del proceso bajo escenarios determinados.

Para establecer condiciones operativas en un equipo piloto y su incidencia sobre el producto procesado, con el fin de aplicar los resultados que se obtengan, en un proceso productivo real a gran escala, se deben utilizar instrumentos de medición que permitan cuantificar las variables involucradas en el proceso.

Debido a los costos y al complejo desarrollo que requiere la implementación de un sistema de control automático se realizó inicialmente solo la selección de equipos indicadores que permitan llevar un registro de las principales variables.

Se determinó que las variables de mayor impacto en el proceso de obtención de óxido de calcio, son [8]:

- Temperatura de la zona de calcinación
- Temperatura de salida de los gases de combustión
- Composición de los gases de escape

La medición de la temperatura de la zona de calcinación del horno y en general de su temperatura interna, se dificulta por el funcionamiento rotacional del equipo. Se pueden realizar cálculos aproximados cuantificando la temperatura en la cara externa del refractario sobre la superficie de la chapa metálica. Para ello se puede utilizar un pirómetro, ya sea óptico o de radiación, que permita a través de cálculos de transferencia de calor estimar la temperatura en el interior del horno.

Los pirómetros son instrumentos que permiten medir temperaturas a distancia (sin contacto). Los de tipo óptico miden la temperatura comparando el color del objeto sólido que miden con una lámpara de comparación, ajustan ambos colores y de esta manera la temperatura. Los pirómetros de radiación capturan la radiación del cuerpo a medir (a más temperatura más radiación).



Figura 42. Pirómetro digital.

Como herramienta para el registro de temperaturas externas del equipo, se sugiere el siguiente instrumento de medición:

Referencia: **FLUKE 568**.

Características [28]:

Termómetro por infrarrojos y de contacto
Sonda termopar tipo K de extremo redondeado
Rango de temperatura:
Con infrarrojo: -40 a 800°C
Con termopar: -270 a 1372°C

Se pueden emplear también para dicha labor, termocuplas. Instrumentos de medición compuestos por un par de conductores de diferentes metales o aleaciones (termopar). En uno de los extremos se encuentra la junta de medición que se debe ubicar en el punto donde se ha de medir; el par de conductores o termopar salen del área de medición hacia el otro extremo del instrumento, donde se encuentra la junta de referencia. El valor que se reporta de temperatura está dado por la diferencia de voltaje entre ambos puntos, por lo que el valor de referencia debe ser conocido y constante.



Figura 43. Termocuplas.

Para su implementación se debe garantizar un apropiado contacto superficial entre el instrumento y la superficie donde se desea medir temperatura, en este caso la chapa metálica del cilindro rotatorio. Además, se deben realizar controles donde

se verifique que la energía térmica que irradia el horno hacia el medio ambiente no modifique el parámetro de referencia con que se determina la temperatura.

En la Tabla 18 se muestran las características de tipos de termocuplas de uso industrial.

Tabla 19. Termocuplas metálicas [29].

Termocuplas metálicas				
Tipo ANSI-ISA	Combinación de metales	Sensibilidad	Composición química	Rangos de temperatura
J	Hierro/constantan	5,6 mV/ 100 ° C	Fe 44 Ni:55 Cu	-40 a + 750
K	Cromel/ Alumel	3,6 mV/ 100 ° C	90 Ni:9 Cr 94 Ni:Al:Mn:Fe	-40 a +1200
T	Cobre/constantan	4,5 mV/ 100 ° C	Cu 44 Ni:55 Cu	-50 a + 400
E	Cromel/constantan	7,9 mV/ 100 ° C	90 Ni:9 Cr 44 Ni:55 Cu	-40 a +900

La temperatura de salida de los gases de combustión se puede medir a través de una termocupla con termopozo (recubrimiento de protección), instalada en un punto de contacto directo con los gases de combustión a la salida del horno.

Se debe obtener la composición porcentual de los gases de escape del horno como referente para determinar la tasa de exceso de aire en el proceso de combustión, que junto a la temperatura de salida de los gases permita definir indicadores operativos que tengan incidencia sobre el proceso de calcinación (balance energético).

Adicionalmente, se sugiere tener un registro de la velocidad de rotación del equipo pues es un parámetro de gran importancia para la determinación del tiempo de permanencia del material en el horno y el avance del mismo entre las zonas térmicas.

Para tener control sobre los recursos requeridos por el equipo en operación se debe definir la tasa de alimentación realizando un pesaje del material que ingresa al horno y medir el caudal de combustible consumido por el quemador.

Como estrategia para no exceder las cargas estructurales de diseño, se planteó la instalación de medidores de deformación (strain gage) sobre las vigas verticales de la estructura de soporte del cilindro rotatorio. Previa calibración de las mismas con el equipo operando en vacío, se puede determinar el peso de caliza que se encuentra en proceso de calcinación y la distribución del mismo en la longitud total del horno. Además, mediciones de corriente en la línea de alimentación del accionamiento eléctrico permiten detectar aumentos considerables de carga.

Las señales generadas por los instrumentos de medición (si así lo permiten) deben enlazarse con un equipo registrador de procesos de múltiples entradas. Usualmente estos equipos cuentan con indicadores digitales que reciben señal de más de 10 instrumentos diferentes y permiten ajustar puntos de alarma para cada uno.

7. Conclusiones

- La gran cantidad de variables involucradas en el diseño de un horno rotatorio horizontal requieren de un amplio análisis de las condiciones operativas que se definan como referencia. Las propiedades de la materia prima, la composición del combustible suministrado, las condiciones climáticas y atmosféricas del sitio de ubicación, entre otras, son variables ajenas a las condiciones de referencia que se definen en este tipo de diseños.
- La labor de diseño realizada en este proyecto no fue propuesta para llegar al grado de detalle que impida realizar modificaciones dimensionales u operativas que se ajusten a un proceso productivo en particular.
- Los múltiples referentes teóricos y experimentales recolectados en el desarrollo del proyecto fueron integrados en un diseño que cumple con los lineamientos clásicos reportados para la industria de la cal y el cemento, y que adicionalmente busca ser una herramienta de actualización tecnológica en la región.
- Es fundamental para la implementación de este diseño validar el análisis térmico realizado, para las condiciones particulares de temperatura que se requieran.
- El proyecto es aplicable como herramienta de investigación para la optimización de procesos de obtención de óxido de calcio en los que se quieran evaluar escenarios definidos, donde se registren de manera confiable las variables de mayor impacto en el proceso.
- La evaluación económica del proyecto depende del tipo de implementación que se desee realizar, teniendo en cuenta las particularidades que esta requiera. Teniendo en cuenta que se reportaron solo los componentes relacionados con el funcionamiento básico del equipo.

8. Referencias

[1] TELLOWS P. Tecnología del Procesado de los Alimentos, Principios y Prácticas. Editorial Acribia, S.A. 1994.

[2] QUIMINET. La cal, tipos y proceso de obtención [en línea]. Disponible en: <http://www.quiminet.com/ar5/ar_hgsAAAssAAAss-la-cal-tipos-y-proceso-de-obtencion.htm> [citado en 16 de Noviembre de 2010].

[3] TORRES D. Diseño mecánico de un horno rotatorio. Trabajo de grado (Ingeniería Mecánica). Universidad del Valle. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica. Cali, 1984.

[4] ORTIZ H. y ORTIZ C. Diseño y recomendaciones de operación de un horno rotatorio de alta temperatura. Trabajo de grado (Ingeniería Química). Universidad del Valle. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Química. Cali, 1984.

[5] LENIS J. y LONDOÑO F. Rediseño y construcción de un horno rotatorio para procesos minerales de alta temperatura. Planta piloto. Trabajo de grado (Ingeniería Mecánica). Universidad del Valle. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica. Cali, 1989.

[6] LOZANO W. Rediseño y puesta en marcha de un horno rotatorio. Trabajo de grado (Ingeniería Mecánica). Universidad del Valle. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica. Cali, 1991.

[7] MORENO D. y ZAMORANO E. Colocación de refractario de puesta en marcha de un horno rotatorio para altas temperaturas. Trabajo de grado (Ingeniería Química). Universidad del Valle. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Química. Cali, 1994.

[8] MONTES A. y PEREA A. Puesta en marcha de un horno rotatorio para altas temperaturas. Trabajo de grado (Ingeniería Química). Universidad del Valle. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Química. Cali, 1996.

[9] ROJAS J. y REINOSO D. Rediseño de un horno rotatorio utilizado para la calcinación de piedra caliza. Trabajo de grado (Ingeniería de Materiales).

Universidad del Valle. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería de Materiales. Cali, 2003.

[10] A. AHLSTRÖM OSAKEYHTIÖ Warkaus Engineering Works. Rotatory kiln nomograph. 1972.

[11] CALDERON C. Estudio de prefactibilidad económica para la utilización de carbón mineral en la fabricación de cal viva. Trabajo de grado. Escuela de Ingeniería Química. Universidad de San Carlos de Guatemala. Disponible en línea: <<http://biblos.usac.edu.gt/>> Guatemala, 2005.

[12] WINGATE, Micheal. Small-Scale Lime-Burning. Intermediate Technology Publications. Londres, 1985.

[13] BOYTON R. Chemistry and Technology of Lime and Limestone. 2nd Edition. New York, 1980.

[14] FLSMIDTH. Rotary kilns for cement plants [en línea]. Disponible en: <<http://www.flsmidth.com/~media/Brochures/Brochures%20for%20kilns%20and%20firing/RotaryKilnsforcementplants.ashx>> [citado en 9 de agosto de 2011].

[15] REBASA Unidad Monclova. Equipos y áreas productivas [en línea]. Disponible en: < <http://www.rebasa.com.mx/html/instalac.htm#hornosrotatorios>> [citado en 9 de agosto de 2011].

[16] EMISON. Hornos rotativos para cal [en línea]. Disponible en: <<http://www.emison.es/hornos/pdf/horno%20de%20cal%20rotativo.pdf>> [citado en 9 de agosto de 2011].

[17] MAERZ OFENBAU AG. Portafolio de productos: Horno rotatorio con precalentador [en línea]. Disponible en: < http://www.maerz.com/incES.php?show=products_kilns_rotary> [citado en 9 de agosto de 2011].

[18] PERRY R., MALONEY J. y GREEN D. Manual del Ingeniero Químico. 4 Ed. McGraw-Hill. 2001.

- [19] BAUMEISTER T., AVALLONE E., BAUMEISTER T. Marks Manual del Ingeniero Mecánico. Volumen 1. 2 Ed. McGraw-Hill. 1992.
- [20] GUINUDINIK J. Accionamientos y Controles Eléctricos. Motores Asincrónicos. UTN Facultad Regional Tucumán. Argentina, 2004.
- [21] BEER F., JOHNSTON E., DEWOLF J. Mecánica de Materiales. 4 Ed. McGraw-Hill. 2007
- [22] NORTON R. Diseño de Máquinas. Prentice Hall. 1999.
- [23] GRUPO SKF. Principios para la selección y aplicación de rodamientos [en línea]. Disponible en: <<http://www.skf.com/portal/skf/home/products?maincatalogue=1&lang=es&newlink=1>>. [citado en 4 de febrero de 2012]
- [24] BAUMEISTER T., AVALLONE E., BAUMEISTER T. Marks Manual del Ingeniero Mecánico. Volumen 2. 2 Ed. McGraw-Hill. 1992.
- [25] GRUPO SKF. Cálculo de cargas equivalentes y vida nominal [en línea]. Disponible en: <<http://www.skf.com/skf/productcatalogue/Forwarder?lang=es&newlink=&prodid=1550812217&action=Calc3>>. [citado en 7 de febrero de 2012]
- [26] DUDA W. Cement Data Book. Reverté S.A. España, 1977.
- [27] SIEMENS. SIMOTICS Low Voltage Motors. Catalog D81.1 January 2012.
- [28] FLUKE. Catálogo de productos: termómetros [en línea]. Disponible en: <<http://www.fluke.com/fluke/coes/Term%C3%B3metros/Fluke-568-566.htm?PID=56090>> [citado en 11 de febrero de 2012]
- [29] UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA. Diseño industrial: Termocuplas [en línea]. Disponible en: < <http://www.ing.unlp.edu.ar/cys/DI/termocuplas.pdf>> [citado en 13 de febrero de 2012]
- [30] ERECOs. Catálogo de productos [en línea]. Disponible en: < <http://www.erecos.com/catalogo.html>> [citado en 17 de agosto de 2011]

[31] MONTALUISA E. y CHAVEZ H. Diseño de un horno para la producción de cal. Trabajo de grado (Ingeniería Mecánica). Escuela Politécnica Nacional. Ecuador, 2008.

[32] FENOSA. ¿Qué es el gas natural? [en línea]. Disponible en: <<http://portal.gasnatural.com/servlet/ContentServer?gnpage=1-40-2¢ralassetname=1-40-4-2-1-0-0>> [citado en 10 de febrero de 2012]

[33] SERRANO J. y CARRANZA Y. Análisis teórico de la combustión en quemadores de gas natural. Universidad de Pamplona. Scientia et Technica Año XI, No. 29, Diciembre de 2005.

[34] HERRERA L. Procesos de transferencia de calor. Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano. Bogotá, 2005.

[35] PIOVAN M. Trenes de engranajes, reductores planetarios y diferenciales. Cátedra: Elementos de Máquinas. Universidad Tecnológica Nacional. Argentina, 2004.

Anexo 1



UNIVERSIDAD DEL VALLE
ESCUELA INGENIERIA MECANICA
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA

HORNO VERTICAL PILOTO

Elaborado por: Santiago Orduz Aladino

Resumen

Debido al alto compromiso de recursos que implica realizar pruebas experimentales en un proceso productivo real, se determinaron los referentes básicos de diseño para la construcción de un horno vertical estacionario para procesamiento de piedra caliza.

Parámetros de Diseño

- Por cada tonelada de piedra caliza se obtienen 0,56 toneladas de Oxido de Calcio (cal viva).
- De la cal viva obtenida, el 10% son productos con falta y/o exceso de calcinación.
- Por cada metro cuadrado de área perpendicular a la longitud del horno, éste debe producir 2,5 Ton/día de cal viva.
- Se debe establecer el tipo de flujo de aire que se va a suministrar (tiro natural, forzado o inducido).

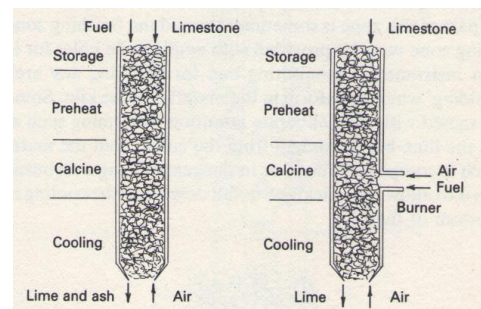


Figura 1. Tipos de entrada de aire y combustible.

- Se recomienda que la altura del horno debe tener una proporción de mínimo 6 veces el diámetro interno del mismo. Siendo 9 veces la proporción recomendada.

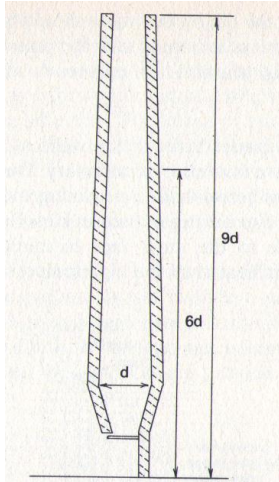


Figura 2. Relación altura-diámetro.

- La geometría interna del horno suele ser un cilindro, presentándose algunas modificaciones que minimicen posibles atrancamientos de piedras en el interior del horno y que faciliten el proceso de descarga del producto. Se recomienda una reducción en el diámetro superior del horno en un ángulo de aproximadamente 3° , y en la base es usual encontrar un cono truncado con una inclinación de 30° , ambos ángulos respecto al eje vertical.

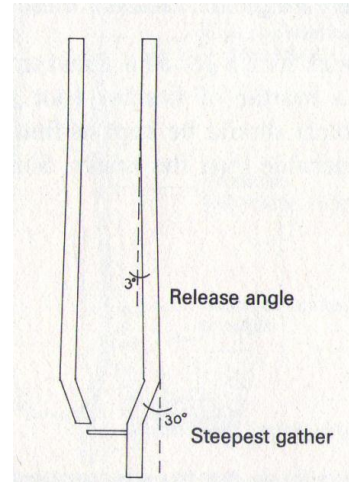


Figura 3. Geometría interna del horno

- La altura establecida debe garantizar que el proceso de calcinación se complete, ofreciendo condiciones tales que se demarquen las 4 zonas de temperatura que requiere el proceso (almacenamiento, precalentamiento, calcinación y enfriamiento).

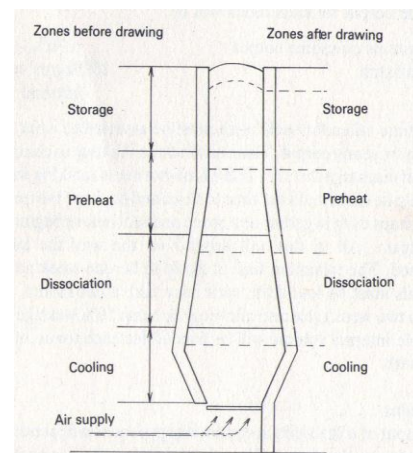


Figura 4. Zonas del proceso de calcinación.

Recubrimiento

- Alta exposición al desgaste abrasivo y altas temperaturas.
- Se recomienda el uso de ladrillos de 40% de Alúmina (mínimo) con buena dureza y superficie lisa.

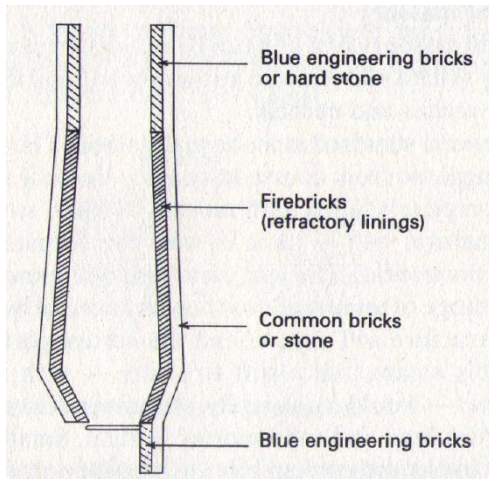


Figura 5. Tipo de recubrimiento por zona térmica.

- Usualmente, se utilizan recubrimientos de 22 cm de espesor llegando a aumentar hasta 69 cm en la zona de calcinación buscando alta eficiencia térmica.
- Algunos ladrillos vienen con geometrías especiales para recubrimiento de estructuras circulares.

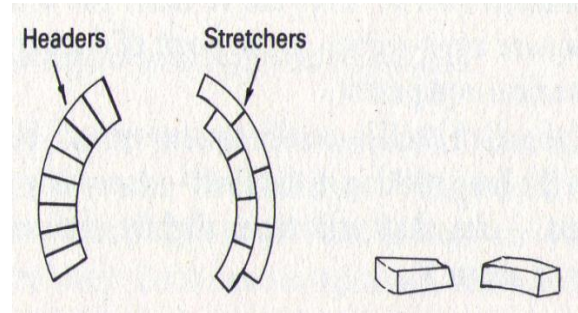


Figura 6. Geometría de ladrillo refractario.

Chimenea

- El uso de chimeneas puede aumentar la altura efectiva del horno y reducir la quema irregular que puede generar la variación del viento en hornos abiertos.

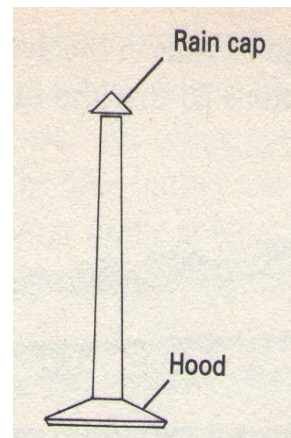


Figura 7. Chimenea básica.

- En ciertos hornos se sumerge cerca de 1m la chimenea sobre la superficie normal del horno en la zona de almacenamiento, parte superior del horno.

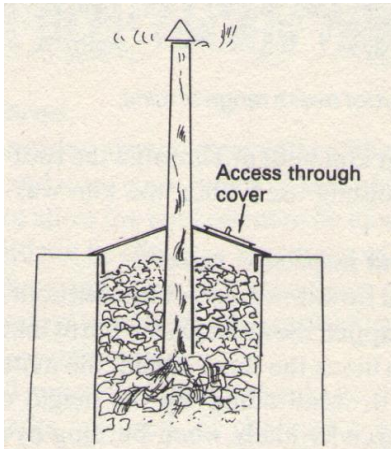


Figura 8. Chimenea sumergida.

- De acuerdo a la ubicación del horno pueda generar una mejoría en el ambiente de trabajo al expulsar a más altura los gases de combustión.

Control e Inspección

- Se recomienda instalar un equipo de medición de temperatura con sensores en el interior del horno a diferentes alturas que permitan

determinar las temperaturas bajas las cuales se está realizando el proceso.

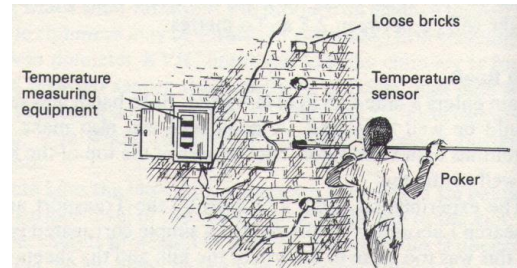


Figura 9. Elementos de inspección y control.

- Se podría requerir de agujeros de control que den acceso al interior del horno que permitan desplazar material obstruido.

Referencias.

- Wingate, M. *Small-Scale Lime-Burning*. London. 1985.
- Boyton, R.S. *Chemistry and Technology of Lime and Limestone*. New York. 2nd Edition. 1980.