

PUESTA EN MARCHA DE UN HORNO ROTATORIO PARA CALCINACION DE
YESO EN LA EMPRESA PROCALCO

JORGE LUIS JAIMES PABÓN

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOQUÍMICAS

ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE
MATERIALES

GRUPO DE INVESTIGACIONES EN MINERALES, BIOHIDROMETALURGIA Y
AMBIENTE

BUCARAMANGA

2011

PUESTA EN MARCHA DE UN HORNO ROTATORIO PARA LA CALCINACIÓN
DE YESO EN LA EMPRESA PROCALCO

JORGE LUIS JAIMES PABÓN

Trabajo de grado para optar al título de
Ingeniero Metalúrgico

DIRECTOR (A):

Dra. ELCY MARÍA CÓRDOBA TUTA

TUTOR:

Ing. CARLOS VARGAS MORÁN
GERENTE DE PROCALCO

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS

ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES

GRUPO DE INVESTIGACIONES EN MINERALES, BIOHIDROMETALURGIA Y
AMBIENTE

BUCARAMANGA

2011

AGRADECIMIENTOS

A la UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER, alma mater de conocimiento, calidad e investigación.

A Carlos Vargas Moran, ingeniero mecánico, Gerente de PROCALCO y amigo, por su apoyo, confianza y respaldo.

A Elcy María Córdoba Tuta, Ingeniera metalúrgica, docente titular UIS, asesora en refractarios y colaboradora oportuna en mi tesis.

A Luis Orlando Aguirre, director de Ingeniería Metalúrgica, docente, amigo y colaborador en el talento humano de los ingenieros.

A Iván Uribe Pérez, ingeniero metalúrgico titular UIS, docente, y acompañante en mi aprendizaje.

A Wilson Jaimés Pabón, estudiante de Ingeniería Civil UNIMINUTO, hermano, aportador en conocimientos de infraestructura y equipos.

A José Luis Caballero Quintero, docente Químico UIS, amigo, colaborador en mi aprendizaje y pionero en la fundamentación química.

A Gustavo Neira Arenas, ingeniero metalúrgico titular UIS, por sus aportes en conocimientos de hornos y por la sugerencia del título del proyecto.

A Afranio Cardona Granados, ingeniero metalúrgico titular UIS, creativo, motivador y aportador de conocimientos en procesos metalmeccánicos.

A todas las personas que no nombre, docentes y amigos, gracias.

JORGE LUIS JAIMES PABÓN

DEDICATORIA

A Dios: Fuente de Sabiduría y calma

A Belén Pabón Barahona, por traerme al mundo y por ser mediadora de mi vida y por su talento maternal, y por impulsarme a alcanzar mis propósitos.

A Luis Antonio Jaimes Correa, el constructor y forjador de mis fortalezas desde mi infancia.

A Islenia Isabel Ibañez Soler, por su paciencia y comprensión.

A Jhofran Steven Jaimes Soler; mi hijo, por ser la persona que lleno mi vida de felicidad y ganas de salir adelante, por ser tan tierno y por ser una razón más para vivir.

Yoraima Jaimes Pabón, por su apoyo incondicional, por ser tan emprendedora y darme ganas de cumplir mis metas, muchas gracias.

Mayerly, Cindy y Yeraldin; mis hermanas quienes me dieron moral en momentos difíciles.

A Walter, Robinson y Wilson; mis hermanos quienes me brindaron las puertas laborales en mis vacaciones.

A mis compañeros de carrera y amigos.

A docentes, industriales, laboratoristas, trabajadores UIS y a todas aquellas personas quienes fueron acompañantes en la formación como Ingeniero Metalúrgico.

JORGE LUIS JAIMES PABÓN

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	16
1. OBJETIVOS	18
2.1. OBJETIVO GENERAL.....	18
2.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	18
3. PERFIL DE LA EMPRESA.....	19
3.1 MISIÓN.....	19
3.2. VISIÓN.....	20
3.3 DIVERSIDAD COMERCIAL.....	20
4. FUNDAMENTOS TEORICOS.....	21
4.1. GENERALIDADES SOBRE LOS HORNOS.....	21
4.1.1. Hornos rotatorios.....	22
4.2. PRODUCCION DE YESO.....	25
4.2.1. Orígenes y propiedades del yeso.....	25
4.2.2. Deshidratación del yeso.....	25
5. METODOLOGIA.....	28
6. DESARROLLO DE LA PRÁCTICA.....	30
6.1. CARACTERIZACIÓN DE LA MATERÍA PRIMA Y EL PRODUCTO	

EN LA ANTIGUA PLANTA DE CALCINACIÓN DE YESO.....	30
6.1.1. Muestreo en la planta industrial de PROCALCO Ltda.....	30
6.1.2 Caracterización de las muestras.....	30
6.1.2.1 Determinación gravimétrica de SO ₃	33
6.1.2.2 Distribución granulométrica de las muestras.....	34
6.2. ACOMPAÑAMIENTO EN LA SELECCIÓN DE MATERIALES DEL HORNO Y SU CONSTRUCCIÓN.....	37
6.2.1. Selección del acero.....	37
6.2.2. Selección de la soldadura.....	39
6.2.3 Selección del refractario.....	43
6.3. MONTAJE DEL HORNO DE CALCINACION DE YESO.....	44
6.4 PUESTA EN MARCHA DEL HORNO ROTATORIO.....	49
6.4.1. Estabilización de la carga y temperatura dentro del horno.....	50
6.4.2 Influencia de la temperatura de calcinación en la calidad del ye producido.....	51
6.5. PROPUESTA DE DISEÑO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DEL MINERAL DE YESO.....	56
6.5.1 La organización de la planta.....	50
6.5.2 Control de emisiones en la planta.....	52
6.5.3. Diseño térmico del horno calcinador.....	62

6.5.4. Cálculo de la potencia necesaria para rotar el horno calcinador.....	69
7. CONCLUSIONES.....	74
8. RECOMENDACIONES.....	76
9. BIBLIOGRAFÍA.....	77
10. ANEXOS.....	78

LISTA DE FIGURAS

	Páginas.
Figura 1. Esquema de un horno rotatorio.....	23
Figura 2. Sentido de rotación.....	24
Figura 3. Fotografía de una pila del mineral de yeso original.....	30
Figura 4. Entrada y salida a través del molino de martillos.....	31
Figura 5. Mineral de yeso molido.....	32
Figura 6. Muestras M1, M2 y M3 en las etapas de producción de PROCALCO Ltda.....	33
Figura 7. Curva de distribución granulométrica para determinar Dp de M1.....	35
Figura 8. Curva de distribución granulométrica para determinar Dp de M2.....	36
Figura 9. Curva de distribución granulométrica para determinar Dp de M3.....	37
Figura 10. Preparación y soldadura.....	38
Figura 11. Soldadura terminada de la carcasa.....	41
Figura 12. Cabina de alimentación.....	41
Figura 13. Soldadura de elementos.....	42
Figura 14. Brillo de llama y aspas del horno.....	42
Figura 15. Horno de producción.....	43

Figura 16. Esquema del horno rotatorio.....	44
Figura 17. Soporte del horno.....	45
Figura 18. Forma de fijar el quemador.....	46
Figura 19. Esquema del quemador	47
Figura 20. Sistema de acople.....	48
Figura 21. Esquema del tanque de alimentación.....	48
Figura 22. Horno rotatorio en producción.....	49
Figura 23. Control de temperatura en el horno.....	50
Figura24. Grafico de ratas de calentamiento; temperatura vs distancia (longitud del horno).....	52
Figura 25. Grafico de ratas de calentamiento; temperatura vs tiempo.....	53
Figura 26. Fotografías de los productos de calcinación del mineral de yeso.....	54
Figura 27. Difractogramas del mineral original y del producto de calcinación del ensayo 4.....	55
Figura 28. Planta de procesamiento del mineral de yeso.....	57
Figura 29. Almacenamiento de yeso en estivas.....	58
Figura 30. Diseño de control de emisiones de la planta.....	58
Figura 31. Variables que intervienen en el cálculo del momento de inercia.....	71

LISTA DE TABLAS

	páginas.
Tabla 1. Contenido de SO ₃ en las muestras M1, M2, M3.....	34
Tabla 2. Distribución granulométrica M1.....	34
Tabla 3. Distribución granulométrica M2.....	34
Tabla 4. Porcentaje de SO ₃ de M1, M2 y M3 en las etapas de producción.....	35
Tabla 5. Características del acero.....	36
Tabla 6. Propiedades mecánicas típicas del metal depositado.....	38
Tabla 7. Composición Química típica del metal depositado, dimensión y amperajes recomendados.....	40
Tabla 8. Características del material aislante.....	40
Tabla 9. Ajustes de temperatura y carga en el horno.....	44
Tabla 10. Ensayos de calcinación a nivel de laboratorio.....	51
Tabla 11. Resultados de estudio de calcinación.....	52
Tabla 12. Características del ACPC Colombiano.....	53

LISTA DE ANEXOS

ANEXO 1. Determinación gravimétrica de SO_3 en yeso.....	72
ANEXO 2. Lo referente de yeso de la norma IRAM 1607.....	74
ANEXO 3. Variables usadas en los cálculos.....	78

RESUMEN

TÍTULO: PUESTA EN MARCHA DE UN HORNO ROTATORIO PARA CALCINACION DE YESO EN LA EMPRESA PROCALCO¹

AUTOR: JORGE LUIS JAIMES PABÓN²

PALABRAS CLAVES: Horno Rotatorio, Marcha, calcinación.

DESCRIPCION:

El objetivo de este proyecto es la “puesta en marcha de un horno rotatorio para la calcinación de yeso en la empresa PORCALCO” y el propósito es proporcionar conocimientos a la industria colombiana sobre la forma de hacerlo, recomendaciones y lo fundamental para que funciones tanto a ACPM y Gas GLP, como combustible, en busca de reducción de costos y mejoramiento de la calidad de los productos de PROCALCO, de cualquier industria colombiana o de otro país que se desempeñen en esta área.

Teniendo en cuenta a PROCALCO como una empresa con visión de crecimiento y de expansión en el mercado y siendo el horno rotatorio eje fundamental en el proceso de calcinación del mineral de yeso, se implementaron diversos trabajos prácticos para poner en marcha un nuevo horno rotatorio, estos fueron; Caracterización granulométrica y química del mineral y a su vez el efecto de la temperatura de calcinación del mineral.

Tomando como base el horno rotatorio actual, se diseñara uno nuevo, buscando mayor productividad y calidad del yeso deshidratado.

Para la puesta en marcha del nuevo horno, se llevara a cabo un estudio del efecto de diversas variables, de tal forma que se establezcan las condiciones más adecuadas para el funcionamiento del horno.

*Trabajo de Grado

**Facultad de Ingenierías Físico- Químicas. Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales. Director: Elcy María Córdoba Tuta. Ingeniero Tutor: Carlos Vargas Moran.

SUMMARY

TITLE: SETTING UP OF A ROTARY KILN FOR GYPSUM CALCINACION PROCALCO BUSINESS³

AUTHOR: JORGE LUIS JAIMES PABÓN⁴

KEY WORDS: rotary kiln, March, calcination.

DESCRIPTION:

The objective of this project is the "implementation of a rotary kiln for calcining gypsum PORCALCO company" and the purpose is to provide Colombian industry knowledge on how to do, recommendations and essential for both functions diesel and LPG gas as fuel, in search of cost reduction and quality improvement PROCALCO products of any industry in Colombia or other country who work in this area. Taking into account PROCALCO as a company with vision for growth and expansion in the market and remains the cornerstone rotary kiln in the process of roasting the mineral gypsum, we implemented various practical work to implement a new kiln, these were: particle size and chemical characterization of the ore and in turn the effect of calcination temperature of the mineral. Based on the current rotary kiln, is designing a new one, seeking greater productivity and quality of dehydrated gypsum. For the launch of the new furnace, to conduct a study of the effect of different variables, so that establishing the right conditions for the operation of the furnace.

*Degree Work

**Faculty of Physical and Chemical Engineering. Metallurgical Engineering and Materials Science. Director: Elcy María Córdoba Tuta. Engineer tutor: Carlos Vargas Moran.

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, la empresa Productos Calcáreos de Colombia (PROCALCO) se encuentra reubicando su planta de producción de yeso, lo cual fue motivado principalmente por el crecimiento demográfico de la población alrededor de sus instalaciones, situadas en un sector de Girón, Kilometro 1, Vía al Aeropuerto Palonegro (Santander).

Además la planta de procesamiento de minerales de yeso finalizó su vida útil (22 años), dado que dichas instalaciones han funcionado desde 1988.

El deterioro del horno rotatorio ha ocasionado disminución de la productividad y por lo tanto descenso en la competitividad. Por tal motivo era imprescindible el diseño y construcción de un nuevo horno, en el cual se pudiera procesar el mineral de yeso de la manera más eficiente y ecológica posible.

En este sentido, se propuso diseñar el nuevo horno, implementando los siguientes cambios con respecto al horno antiguo:

1) Aumento de la capacidad de producción: de 225 a 675 toneladas/mes de yeso empacado.

2) Cambio de combustible: El horno funcionaba con A.C.P.M y se deseaba que el nuevo horno funcionara también con gas propano. Es bien conocido que el ACPM (combustible líquido) genera hollín, el cual es liberado junto con los gases, lo que hace que disminuya la eficiencia de dicho combustible. Además, dicho material puede depositarse sobre las superficies de transferencia de calor, reduciendo tal

proceso. Por su parte, el hollín que sale por las chimeneas de los hornos produce una gran contaminación del aire ambiental.

3) Aumento de las dimensiones y velocidad de rotación del horno: Se decidió aumentar la longitud con el propósito de hacer un mejor aprovechamiento del calor, preservando el volumen del horno inicial. Este cambio implicó la modificación de la velocidad de rotación del horno desde 2.15 hasta 2.35 revoluciones por minuto, dado que al reducir el diámetro del horno el material queda más próximo a la llama, por lo que éste podría sobrecalentarse, perjudicando las propiedades del producto final.

4) Teniendo en cuenta los cambios antes mencionados (longitud y velocidad de rotación del horno), resultó imprescindible el ajuste de otras variables, tal como el ángulo de inclinación del horno. De manera que no se aumentara el tiempo de residencia dentro del horno, dado que ello implicaría una disminución de la capacidad de producción de la planta.

Con base en lo anterior, las actividades desarrolladas en el presente Trabajo de Grado, en modalidad de Practica Empresarial, se enfocaron en la participación del estudiante en las labores de construcción y puesta en marcha del nuevo horno rotatorio de la empresa PROCALCO.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

- Poner en marcha el horno rotatorio de calcinación de yeso en la empresa PROCALCO.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Calcular las dimensiones del horno, con el propósito de hacer los respectivos cortes al acero utilizado, doblado, armado, preparación del material y soldaduras respectivas.
- Seleccionar los materiales adecuados para los recubrimientos externos e internos, cintas engranadas, engranes, cadena y todos sus demás elementos.
- Ajustar las variables operacionales del horno, teniendo en cuenta la carga del mineral, velocidad de rotación, tiempo de residencia y temperatura dentro del horno.

3. PERFIL DE LA EMPRESA

Productos Calcáreos de Colombia (PROCALCO) es una empresa santandereana dedicada al procesamiento y comercialización de minerales no ferrosos, tales como cal, yeso, estuco caolín y fertilizantes agrícolas. Cuyos principales clientes son empresas que se desenvuelven en actividades agroindustriales y de construcción.

De los antes mencionados, el principal producto de la empresa es el yeso. En tal sentido, la producción actual de la empresa maneja un rango amplio de producción comprendido entre 225 y 675 toneladas al mes de yeso empacado. Este rango de producción fue creado con el propósito de suplir el mercado de acuerdo al consumo y regulación del mercado.

PROCALCO se destaca como una empresa integral que ha proyectado, diseñado, construido e instalado cada una de la maquinas constitutivas del proceso de transformación de minerales, tales como: molinos, hornos rotatorios, silos y mezcladoras. Además, la empresa tiene el interés de rediseñar la línea tradicional de procesamiento, orientándola hacia el buen uso de la energía, la preservación prioritaria del medio ambiente y el uso de los recursos naturales dentro de los criterios de desarrollo sostenible.

3.1. MISIÓN

PROCALCO es una empresa dedicada a la transformación, procesamiento y comercialización de minerales no ferrosos para el sector de la construcción y materias primas para industrias que trabajan con abonos a base de minerales. Junto a un equipo humano responsable y especializado, brinda calidad y servicio a

las necesidades de sus exigentes clientes buscando soluciones prácticas para cada una de sus necesidades.

3.2. VISION

PROCALCO tiene proyectado ser una empresa líder a nivel “Nacional e Internacional” en la fabricación y comercialización de productos calcáreos para el sector de la construcción y agro-industrial.

Tal objetivo se cumplirá mediante el desarrollo de productos más rentables y con mejores prestaciones y características, para lo cual cuenta con talento humano competente y altamente comprometido con el logro de los objetivos de la empresa.

3.3. DIVERSIDAD COMERCIAL

PROCALCO tiene por objeto abrir la puerta hacia el mercado con productos tales como: estuco plástico, pegamentos para cerámica y fertilizantes agrícolas, constituidos básicamente de calcio, azufre, fósforo, potasio, magnesio y nitrógeno.

Los productos de Procalco se comercializan en las siguientes ciudades:

*Bucaramanga

*Bogotá

*Santa Marta

*Valledupar

*Villavicencio

*Yopal

*Medellín

*Montería

*Cartagena

*Tunja Duitama

*San Gil y Socorro

*Barbosa

*Cúcuta Y Pamplona

*Aguachica

*Chiquinquirá

*Cali

*Barrancabermeja

4. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

4.1 GENERALIDADES SOBRE LOS HORNOS

Los hornos son dispositivos generadores de calor, el cual promueve reacciones químicas o cambios de estado, tales como fusión, calcinación, vaporización o simplemente el calentamiento de un material de cualquier tipo (metales, cerámicos, plásticos, polímeros, etc.). En este sentido, los hornos con bajas temperaturas (cercasas a 100°C) sirven para evaporar el agua de los minerales. Las temperaturas elevadas (cercasas a 800 °C) vuelven más blandos la mayoría de los metales, capacitándolos para operaciones de deformación por flexión, forja, estampación, extrusión o laminación. Por su parte, los hornos con temperaturas más elevadas a las anteriores, permiten la fusión de metales y minerales [1].

La temperatura deseada en el horno se produce por la generación de calor, para lo cual se emplean dos métodos:

- a) Combustión de combustible.
- b) Conversión de energía eléctrica en calor.

El tipo de horno de combustión se emplea mucho más que el eléctrico; sin embargo, para muchas aplicaciones se prefiere el eléctrico, porque ofrece ventajas que no pueden ser medidas por el coste de combustible [1].

Teniendo en cuenta que en el presente proyecto se involucra la puesta a punto de un horno rotatorio para la calcinación de mineral de yeso, a continuación se describe el funcionamiento de este tipo de horno que usa combustible para generar calor.

4.1.1. Hornos rotatorios

Un horno rotatorio es un reactor químico que se usa para tostar o calcinar materiales como bauxita, yeso, alúmina, mineral de hierro, cromita, pirita y fosfatos. Algunos se utilizan para regenerar absorbentes, para producir sulfuros de bario y sodio, para descomponer el sulfuro ferroso y para desfluorar los fosfatos naturales. Sin embargo el Clinker del cemento es el mayor material tratado en este tipo de horno.

Antiguamente se usaban los hornos de cuba para las operaciones que desempeña el horno rotatorio actualmente, pero ahora es viable trabajar con el horno rotatorio porque con él se obtienen temperaturas altas, para fusión y bajas para secado. Además permiten la posibilidad de utilizarlos en procesos continuos o discontinuos (intermitente) [2].

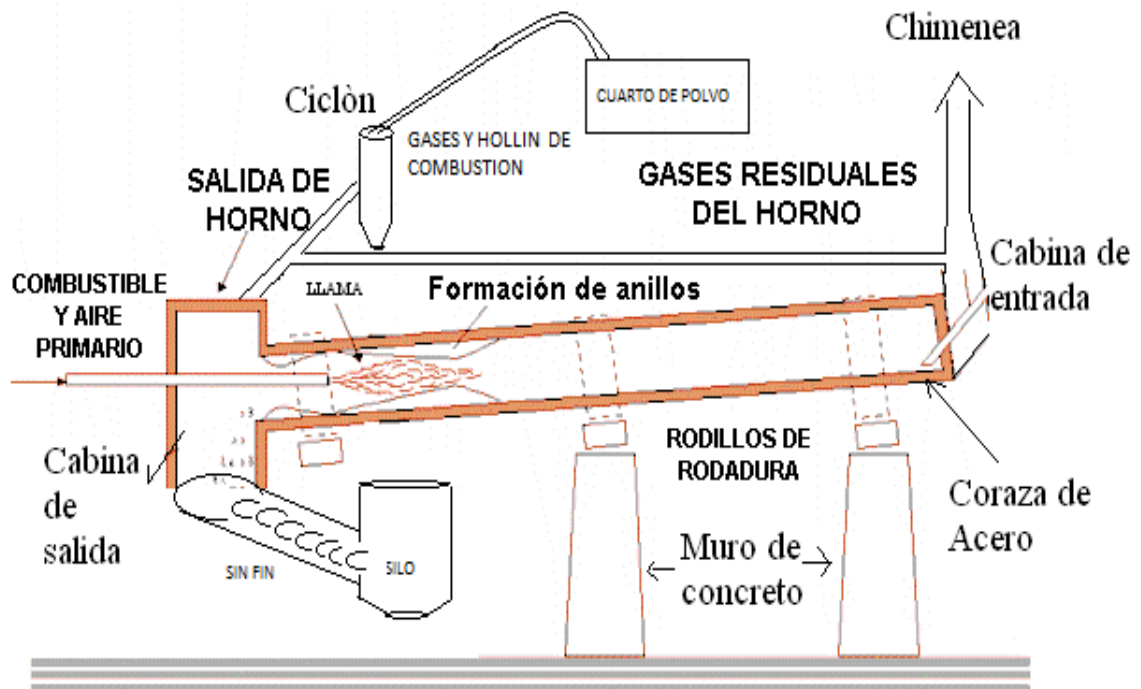
Este horno consiste de un cilindro de acero, recubierto interna o externamente por un material refractario. Los hornos rotatorios con recubrimiento interno se diseñan para soportar temperaturas cercanas y superiores a 1000 °C, por ejemplo para la reducción de ferroníquel. Por su parte, los hornos rotatorios con recubrimiento externo, se diseñan para aplicaciones en los que la temperatura está entre 100 y 600 °C, como es el caso de los hornos de calcinación de yeso [3].

Como su nombre lo indica, los hornos rotatorios poseen un mecanismo de rotación sobre su eje, el cual permite el transporte del material por tratar dentro del horno [4]. El horno tiene dos cabinas (Figura 1), situadas en los extremos del cilindro; la primera, en donde inicia el proceso de calentamiento se denomina cabina de alimentación. Se llama así por tener una abertura en la vista frontal para la entrada del material y una chimenea en la parte superior. Gracias a la inclinación del horno y a su rotación, el material alimentado se mueve cuesta abajo hasta la segunda cabina, denomina cabina de salida. Desde ella se descarga el producto a un mecanismo de transporte que saca el material al exterior.

Además, la cabina de salida tiene otra función: extraer el humo y hollín generado en el proceso de combustión hacia un ciclón, para recuperar sólidos y secuencialmente filtrar los humos en el cuarto de polvo, tal como se muestra en la figura 1.

El cuerpo del horno (carcasa rígida de acero) tiene soldados anillos de rodamiento que se montan en los rodillos de soporte y permiten girar el horno. Los rodillos se encuentran sujetos a una base metálica que se encuentra incrustada en muros de concreto como se muestra en la figura 1. En cada base metálica o muro de concreto se encuentran dos rodillos de soporte que dan estabilidad y equilibrio al horno durante su rotación continua.

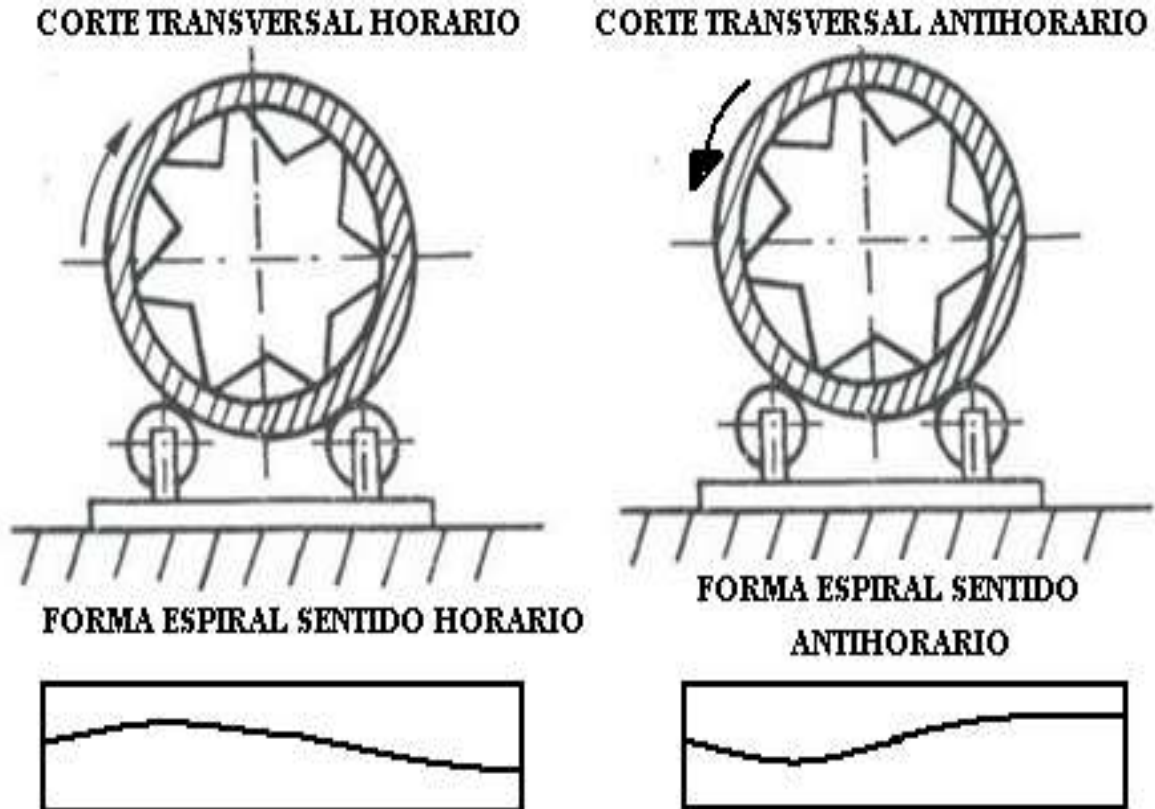
Figura 1. Esquema de un horno rotatorio



Fuente: autor del proyecto

De acuerdo al sentido de rotación del horno se unen por soldadura en su pared interior las aspas en forma de espiral, tal como se muestra en la figura 2. Esto se hace para que haya un buen mezclado, una apropiada exposición al calor dentro del horno y para direccionar el material hacia la zona inferior.

Figura 2. Sentido de rotación del horno y forma de las aspas interiores



Fuente: autor del proyecto

Después de la alimentación del mineral, este desciende gracias a su rotación, hasta llegar a un punto bajo en donde hay incremento de su temperatura porque se acerca a la llama. Esto se denomina proceso en contra flujo, porque el material desciende y la llama asciende.

4.2. PRODUCCIÓN DE YESO

4.2.1. Origen y propiedades del yeso

El yeso es un mineral constituido por sulfato de calcio, que se encuentra en muchos lugares de la superficie terrestre, formando unas veces masas compactas o rocas blandas, otras veces masas terrosas y en algunos casos disueltos en determinadas aguas, llamadas selenitosas.

Se considera que el yeso se originó hace 200 millones de años como resultado de depósitos marinos, cuando parte de lo que ahora son nuestros continentes eran inmensas extensiones oceánicas. Durante este período algunos mares se secaron dejando lechos de yeso que se recubrieron para ser descubiertos posteriormente por el hombre [5].

El yeso tiene poca dureza y es poco resistente a la interperie por lo que raras veces se emplea como piedra de exterior.

El mineral de yeso puede contener impurezas tales como: carbonato de cal, arcilla, betún, óxido ferroso, etc., que pueden conferirle color amarillento, rojizo, verdoso, azulado u oscuro. Estas impurezas se deben eliminar cuando se quiere obtener un producto fino, y sólo la arcilla, la arena y el carbonato de cal pueden tolerarse en pequeñas cantidades en la fabricación del yeso grueso, empleado en construcción.

4.2.2. Deshidratación del yeso

Cuando el mineral de yeso se somete a temperatura elevada, en hornos de diversos tipos, se obtiene el yeso cocido, o yeso comercial, en forma de polvo más o menos blanco. Este polvo amasado con agua en la proporción conveniente da lugar a la formación de una masa untuosa, aglomerante, que se emplea en las

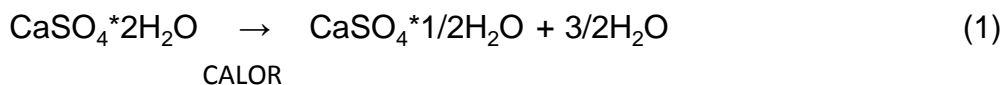
obras de albañilería para unir entre sí los materiales. También se utiliza para revoques y enlucidos, para la elaboración de piezas o elementos decorativos, etc.

El estudio de los efectos de la cocción del mineral de yeso se debe al químico francés Lavoisier (1743-1794), quien determinó que dicho mineral contiene dos moléculas de agua de cristalización en la proporción de la cuarta parte de su peso, o sea, un 25% aproximadamente.

Luego de retirar el agua de cristalización, mediante la acción de calor, si se adiciona agua, el yeso retoma su estado original desprendiendo así calor y presentando un rápido endurecimiento. Esta propiedad puede serle dada o quitada, al yeso, según se le quite más o menos agua de cristalización. De aquí las diversas clases de yeso que pueden obtenerse.

Lavoisier observó también que el yeso cocido en exceso pierde la facultad de fraguar, y al amasarlo con agua forma una pasta friable que se reduce a polvo al evaporarse el agua de amasado [5].

El mineral de yeso o sulfato de calcio bihidratado, con dos moléculas de agua de cristalización, es lo que se denomina yeso crudo ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), que al calentarlo entre 160 y 180 °C se transforma en sulfato de calcio semihidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$):



Cuando al sulfato de calcio semihidratado se le aplica agua, él produce una reacción altamente exotérmica e incorpora o recupera el agua que tenía químicamente en estado natural, es decir se revierte la reacción (1):



Al seguir calentando entre 180 y 200 °C, se elimina la mayor parte de la media molécula restante, pero si se deja en contacto con el aire la recupera parcialmente. Este yeso, amasado con agua, fragua tan rápidamente que no puede aplicarse como mortero, sirviendo en cambio para estucos y modelado.

La aptitud para el fraguado disminuye gradualmente cuando se cuece el yeso a temperaturas más elevadas.

De 200 a 250 °C se obtiene un yeso con ligero residuo de agua, con fraguando muy lento y buena resistencia.

De 250 a 400 °C se obtiene un yeso de fraguado aparentemente rápido, pero con resistencia casi nula.

De 400 a 700 °C, conseguida la deshidratación total, se forma el yeso anhidro (CaSO_4) o yeso cocido a muerte, de fraguado casi nulo.

De 750 - 800 °C, empieza a formarse el yeso hidráulico.

De 800 - 1000 °C, se obtiene el yeso hidráulico normal, o de pavimento.

De 1000 - 1400 °C, el producto es yeso hidráulico con mayor proporción de cal libre y fraguado más rápido [3].

5. METODOLOGÍA

La metodología propuesta para el logro de los objetivos consistió de seis fases, las cuales se describen a continuación:

Fase I: Consulta, asesoría y argumentación.

En esta fase del proceso se hizo una revisión bibliográfica de toda la información necesaria antes de llevar a la práctica. Se recopiló información relacionada con el diseño del horno rotatorio y se analizaron los criterios de selección de los materiales.

En esta fase también se incluye el reconocimiento de la planta: equipos y operaciones unitarias del procesamiento del mineral de yeso. Este reconocimiento de la planta permitió realizar un sencillo balance de materia del proceso.

Fase II: Pruebas experimentales a nivel de laboratorio

En primer lugar, el mineral original y el producto final fueron caracterizados granulométrica y químicamente (%SO₃). Este último se determinó por un método gravimétrico (ver Anexo 1) [PEDRAZA R. Juan Francisco, CAMARGO H. Jaime. Practicas de química analítica cuantitativa, Departamento de química, Universidad industrial de Santander. Bucaramanga, Abril de 1989. Pág. 6-8.].

En segundo lugar, se evaluó a nivel de laboratorio el efecto de la temperatura de calcinación del mineral en la calidad del yeso obtenido. En este sentido, la variable respuesta fue la concentración de SO₃ en el yeso producido. Adicionalmente se hizo la prueba de fraguado en el yeso calcinado, para lo cual se siguió la norma ISO 6873 (ver anexo 2) [Norma IRAM, 1607. Yesos y cales].

Fase III: Acompañamiento en la selección de materiales y en el proceso de construcción del horno rotatorio en la empresa PROCALCO.

Durante esta fase el practicante opinó y contribuyó con conocimientos teóricos, para optar por las mejores opciones cada vez que hubo que tomar decisiones relacionadas con la construcción del horno. El practicante ayudó con la selección de los aceros y refractarios adecuados para el horno. Además acompañó a los operarios con la tarea de las soldaduras.

Fase IV: Trabajo en equipo con los técnicos e ingenieros para la puesta en marcha del horno

En esta fase el practicante utilizó los resultados experimentales de laboratorio para la puesta en marcha del horno rotatorio. Se acudió a las Fases I y II como soporte técnico para el buen desempeño del equipo.

Fase V: Valoración e interpretación de los resultados

Hubo una concepción y evaluación de los resultados teniendo como base de comparación el Horno antiguo de PROCALCO, con el propósito de analizar las mejoras o sus fallas si era el caso. En esta fase se tomó nota de lo ocurrido en cada evento, con fotos y descripción visual para dar soluciones a los problemas detectados.

Fase VI: Reporte final y celebración del logro de trabajo

Redacción definitiva del documento basada en la información recopilada durante el tiempo de práctica. Se entregó el documento final a la Universidad Industrial de Santander y a la empresa PROCALCO.

Las dos partes: La UIS (Universidad Industrial de Santander) y PROCALCO (Productos Calcáreos de Colombia) con su auto alimentación tanto académica como empresarial, celebran los aportes dados al progreso Empresarial.

6. DESARROLLO DE LA PRÁCTICA

6.1 CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA Y DEL PRODUCTO EN LA PLANTA DE CALCINACIÓN DE YESO

6.1.1 muestreo en la planta industrial de PROCALCO Ltda

El mineral de yeso procesado en la empresa PROCALCO es originario de la Guajira. La empresa se surte de dicho mineral cada 8 días. La materia prima descargada en la planta ha sido secada por el proveedor con ayuda de la energía solar.

El material recibido en la planta ha sido sometido a un proceso de trituración por parte del proveedor, por tal motivo su granulometría es inferior a 2 cm, aproximadamente (ver figura 3).

Figura 3. Fotografía de una pila del mineral de yeso



Fuente: autor del proyecto

Para la caracterización del mineral, se partió de una carga de éste, de aproximadamente 12 toneladas. Se tomaron 50 muestras de diferentes partes del montón con una pala, luego de su homogenización se tomó una muestra de 2 kg, aproximadamente, para la determinación de su distribución granulométrica. El resto del mineral se molió en el molino de martillos (figura 4), el cual tienen acoplado un tamiz clasificador con abertura de 7 mm.

Figura 4. Entrada y salida del material a través del molino de martillos



Fuente: autor del proyecto

Se tomaron 10 muestras del montón molido, ver figura 5. De las muestras se tomó una submuestra de 3000 gramos, por el método de cuarteo, para ser analizada.

Figura 5. Mineral de yeso molido



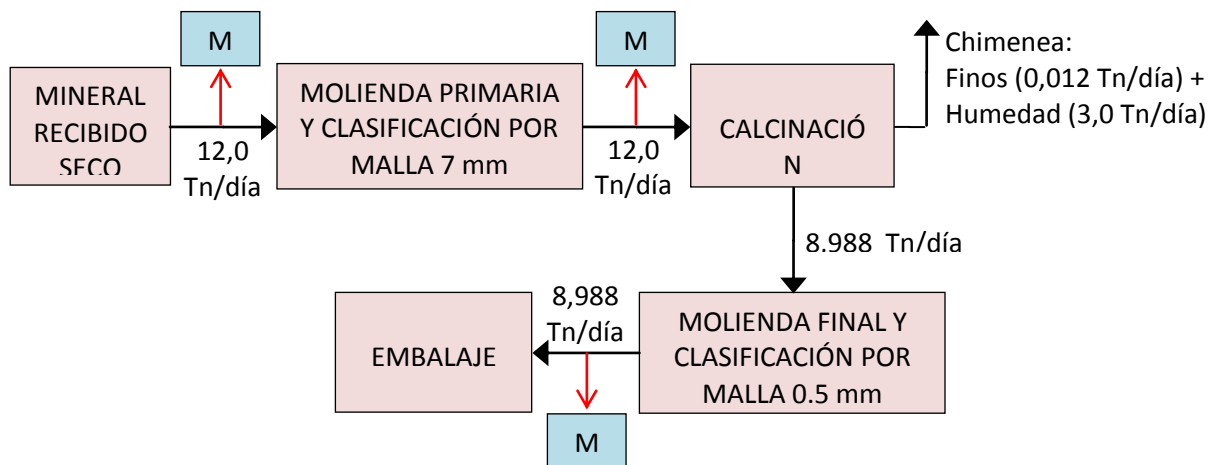
Fuente: autor del proyecto

Adicional a las anteriores, se muestreó el producto final. En resumen, se tomaron 3 muestras, denominadas M1, M2 y M3 respectivamente (ver figura 6). La primera al recibir el material seco (M1), la segunda luego de la molienda primaria y su clasificación en malla 7 mm (M2). La tercera muestra (M3) corresponde al producto final luego de calcinar y clasificar por malla 0.5 mm. Las tres muestras se analizaron granulométrica y químicamente (determinación del porcentaje de SO_3).

En la figura 6 se presenta un esquema sencillo de las etapas involucradas en el procesamiento del mineral de yeso. De acuerdo con el balance de masa realizado, diariamente se procesan 12 toneladas de mineral, aproximadamente. La primera

etapa del proceso consiste de la molienda en molino de martillos y clasificación por malla de 7 mm, de aquí se obtiene el mineral listo para su calcinación. La corriente de mineral calcinado corresponde a aproximadamente el 75% del peso del mineral alimentado en el horno, es decir 8,988 Tn/día. El peso perdido corresponde al vapor generado (3 Tn/día) a partir del agua libre y de constitución eliminado durante la calcinación, así como a los finos (Tn/día) que son desplazados por los gases a través de la chimenea del horno.

Figura 6. Etapas del proceso de producción de yeso en PROCALCO Ltda.



Fuente: autor del proyecto

6.1.2 caracterización de las muestras

A continuación se presentan los resultados de los análisis químico y granulométrico de las muestras M1, M2 y M3.

6.1.2.1 Determinación gravimétrica de SO₃

Los resultados de los análisis se presentan en la tabla 1. Se observa que el mineral original presenta un contenido de SO₃ de 41,8%, el cual es inferior al contenido teórico del sulfato de calcio bi-hidratado (46,51%), lo cual se debe a la posible presencia de impurezas en el mineral y a la humedad presente en éste. Luego de la calcinación, el contenido de SO₃ aumenta a 51,5%, este valor también

es menor al teórico del yeso semi-hidratado (55,16%), lo cual podría indicar que no ocurrió la transformación completa del mineral o que, simplemente, el yeso calcinado recuperó parte de la humedad perdida.

Tabla 1. Contenido de SO₃ en las muestras M1, M2 y M3

Muestra	% SO ₃
M1	41.8
M2	41.8
M3	51.5

Fuente: Autor del proyecto

6.1.2.2. Distribución granulométrica de las muestras

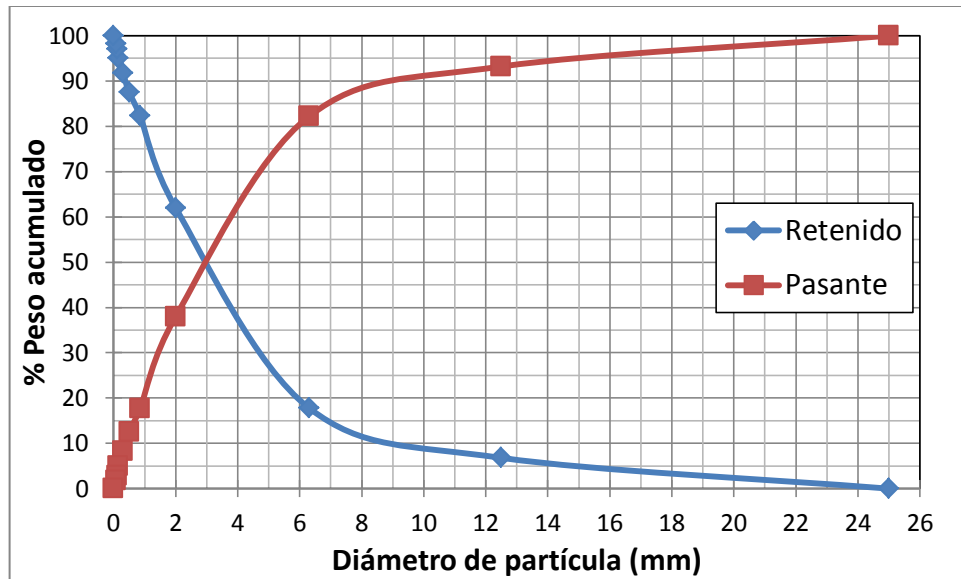
Las distribuciones granulométricas de las muestras M1, M2 y M3 se muestran en las tablas 2, 3 y 4 y en las figuras 7, 8 y 9. El mineral original (M1) tiene un tamaño de partícula de aproximadamente 2 cm y, de acuerdo con la distribución granulométrica (Tabla 2 y Figura 7), el tamaño medio de partícula es de 3 mm.

Tabla 2. Distribución granulométrica de M1

ABERTURA MALLA (mm)	PESO RETENIDO EN MALLA (g)	% PESO RETENIDO EN MALLA	% PESO RETENIDO ACUMULADO	% PESO PASANTE ACUMULADO
25	0,0	0,0	0,0	100,0
12,5	34,0	6,8	6,8	93,2
6,3	55,3	11,1	17,8	82,2
2	220,7	44,1	62,0	38,0
0,85	101,3	20,3	82,3	17,7
0,5	26,4	5,3	87,5	12,5
0,3	21,0	4,2	91,7	8,3
0,15	16,5	3,3	95,0	5,0
0,105	10,5	2,1	97,1	2,9
0,074	5,1	1,0	98,2	1,8
BANDEJA	9,2	1,8	100,0	0,0
TOTAL	500,0	100,0		

Fuente: Autor del proyecto

Figura 7. Curva de distribución granulométrica para M1



Fuente: Autor del proyecto

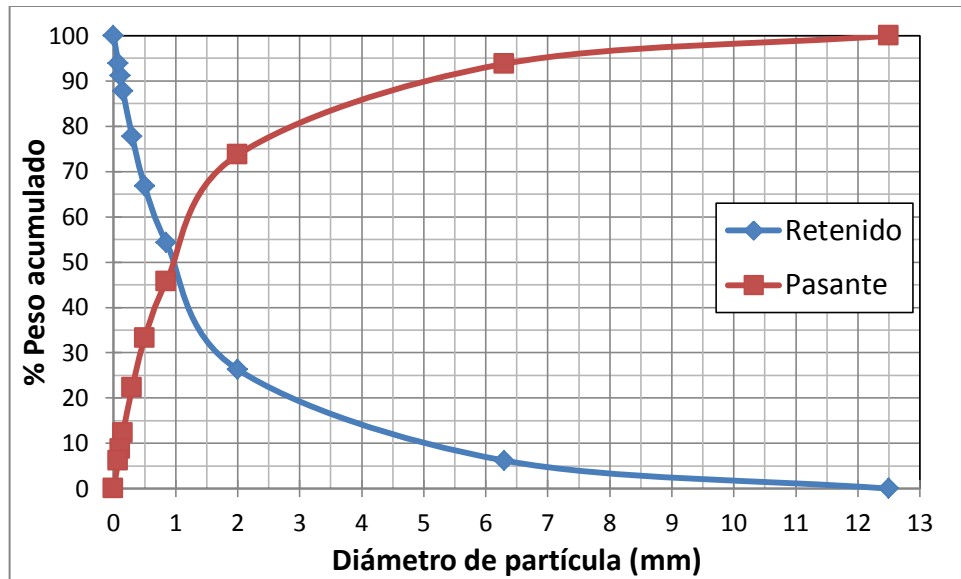
Luego de la molienda del mineral por el molino de martillos (M2), éste queda con un tamaño máximo de partícula de 7 mm y un tamaño medio de 1 mm, tal como se aprecia en la Tabla 3 y la figura 8.

Tabla 3. Distribución granulométrica de M2

ABERTURA MALLA (mm)	PESO RETENIDO EN MALLA (g)	% PESO RETENIDO EN MALLA	% PESO RETENIDO ACUMULADO	% PESO PASANTE ACUMULADO
12,5	0,0	0,0	0,0	100,0
6,3	31,1	6,2	6,2	93,8
2	100,6	20,1	26,3	73,7
0,85	139,9	28,0	54,3	45,7
0,5	62,3	12,5	66,8	33,2
0,3	54,8	11,0	77,7	22,3
0,15	49,8	10,0	87,7	12,3
0,105	17,8	3,6	91,2	8,8
0,074	13,4	2,7	93,9	6,1
BANDEJA	30,4	6,1	100,0	0,0
TOTAL	500,0	100,0		

Fuente: Autor del proyecto

Figura 8. Curva de distribución granulométrica para M2



Fuente: Autor del proyecto

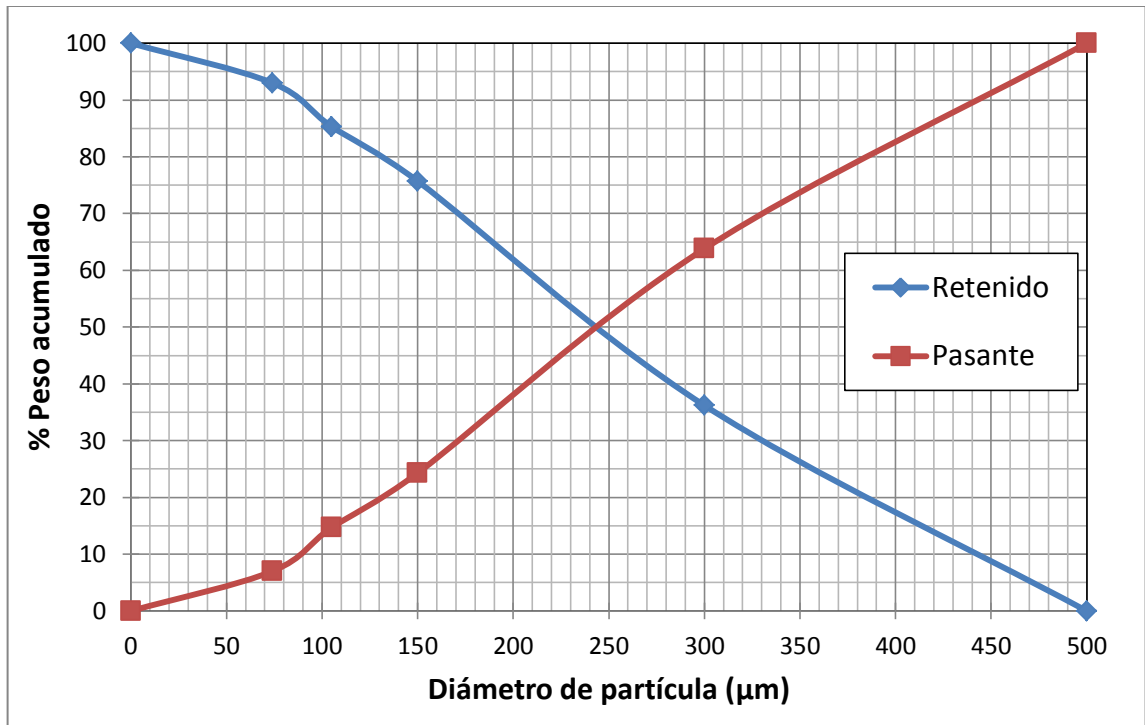
Por su parte, el producto final, luego de la calcinación del mineral y su molienda en molino de martillos, tiene un tamaño máximo de partícula de 500 μm y un diámetro medio de 245 μm (ver Tabla 4 y figura 9).

Tabla 4. Distribución granulométrica de M3

ABERTURA MALLA (μm)	PESO RETENIDO EN MALLA (g)	% PESO RETENIDO EN MALLA	% PESO RETENIDO ACUMULADO	% PESO PASANTE ACUMULADO
500	0,0	0,0	0,0	100,0
300	36,2	36,2	36,2	63,8
150	39,5	39,5	75,7	24,3
105	9,6	9,6	85,3	14,7
74	7,7	7,7	93,0	7,0
BANDEJA	7,0	7,0	100,0	0,0
TOTAL	100,0	100,0		

Fuente: Autor del proyecto

Figura 9. Curva de distribución granulométrica para M3



Fuente: Autor del proyecto

Teniendo en cuenta que las distribuciones de tamaño en las diferentes etapas de tratamiento del mineral de yeso son apropiadas para la obtención de yeso comercial, se decidió no hacer modificación algunas en las operaciones de molienda-clasificación de la planta.

6.2 ACOMPAÑAMIENTO EN LA SELECCIÓN DE MATERIALES DEL HORNO Y SU CONSTRUCCIÓN

6.2.1 Selección del acero

Para la fabricación del cuerpo del horno se seleccionó el acero AISI–SAE 1045, el cual se caracteriza por una alta ductilidad y dureza suficiente para resistir la abrasión del yeso. En la tabla 5 se presentan sus propiedades más importantes.

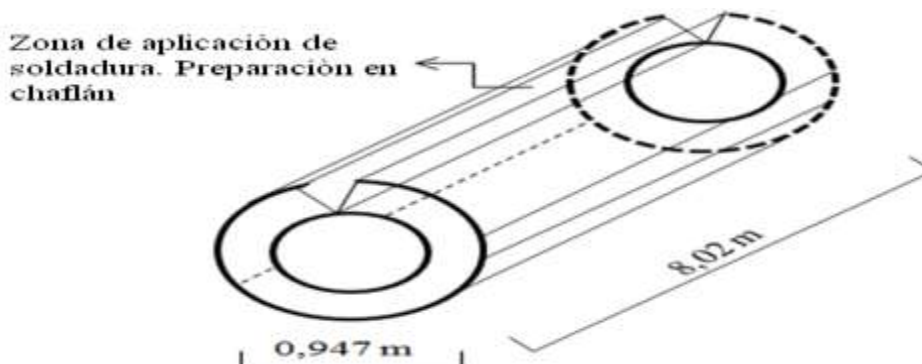
Tabla 5. Características del acero AISI- SAE 1045

Propiedades mecánicas	Propiedades físicas	Propiedades químicas	Tratamiento térmico
Dureza 163HB (84 HRb)	Densidad: 7,87 g/cm ³	0,43-0,50 % C	Normalizado a 900 °C
Esfuerzo de fluencia 310 Mpa(4500PSI)		0,6-0,9 % Mn	
Esfuerzo máximo 565MPa (81900 PSI)		0,04% P máx	Recocido a 790°C
Elongación 16% (en 50mm)		0,05 % S máx	
Reducción de área (40%)			
Módulo de elasticidad 200GPa (29000 KSI)			
Maquinabilidad 57% (AISI 1212 = 100%)			

Fuente: ASTM A108 - 07 Standard Specification for Steel Bar, Carbon and Alloy, Cold-Finished

La forma tubular del horno se consiguió por deformación plástica de 8 láminas de 3x1 m, soldadas con una preparación en chaflán, ver figura 10. El chaflán se obtiene al doblar la lámina y juntar sus dos extremos. Es importante tener en cuenta que el chaflán debe tener un ángulo muy cercano a 60°, para que la entrada del material de soldadura penetre hasta el fondo. Por su parte, la soldadura seleccionada fue west Arco E 7018, de la cual se hablará en el siguiente apartado.

Figura 10. Preparación en chaflán de las láminas de acero para su soldadura



Fuente: autor del proyecto

La lámina usada tiene que tener propiedades de buena ductilidad y alta dureza para que resista la abrasión del yeso. Por ello se seleccionó el acero AISI-SAE 1045, cuyas láminas fueron obtenidas por trabajo en caliente (hot rolled).

6.2.2 Selección de la soldadura

El electrodo AWS E 7018 se utilizan para soldaduras de acero al carbón de hasta 70000 lb/pulg² de resistencia a la tensión, en aplicaciones en estructuras, tuberías y tanques a presión, calderas, vagones de ferrocarril, etc., por lo que cumple con los requerimientos para la fabricación del horno.

El electrodo AWS E7018 es de revestimiento tipo básico y puede ser utilizado con corriente directa o corriente alterna (7 OCV mínimo). Debido al buen contenido de hierro, tiene una alta tasa de deposición y se pierde poco por salpicadura. Su extremo de arco grafitizado le confiere un excelente encendido para que el hierro se funda y produzca un buen depósito de soldadura, generando así una excelente calidad radiográfica.

➤ Recomendaciones de aplicación:

Se debe mantener un arco corto, evitando movimientos bruscos del electrodo. Al usar corriente alterna, el transformador debe tener por lo menos 78 V en vacío. En posiciones diferentes a la plana deben utilizarse electrodos de 5/32" (4mm) o de menor diámetro. Las propiedades mecánicas de este tipo de soldadura se resumen en la tabla 6, mientras que en la tabla 7 se muestran los elementos aleantes más importantes y las recomendaciones de corriente para llevar a cabo la soldadura.

Tabla 6. Propiedades mecánicas típicas del metal depositado

Resistencia a la tracción:	51-59 Kg/mm ² (72-84 Ksi)
Límite de fluencia:	43-51 Kg/mm ² (62-72 Ksi)
Elongación:	24-36%
Resistencia al impacto Charpy en Va-29°C: 70 Joules	

Tabla 7. Composición química típica del metal depositado, dimensión y amperajes recomendados

Carbono	0,05-0,10%	Manganeso	1,00-1,40%
Silicio	0,40-0,65%	Fósforo	0,035% máx
Azufre	0,035% máx		

Dimensión	Amperajes recomendados
2,4x300 mm (3/32")	70 -100A
2,4x350 mm(3/32")	70 -100A
3,2x350 mm (1/8")	100-145A
3,2x450 mm (1/8")	100-145A
4,0x350 mm(5/32")	135-200A
4,0x450 mm(5/32")	135-200A
4,8x350 mm (3/16")	170-270A
4,8x450 mm (3/16")	170-270A
6,4x 450 mm (1/4)	240-400 ^a

Fuente: ANSI/AWS A5.1/A5.1M:2004, Specification for Carbon Steel Electrodes for Shielded Metal Arc Welding. American Welding Society / 05-Sep-2003 / 54 pages / ISBN: 0871716429.

Teniendo en cuenta el espesor de la lámina de acero (AISI- SAE 1045), se seleccionó el amperaje de trabajo (107-270A). El ciclo de trabajo fue de 40 minutos y 20 minutos de descanso del equipo, lo cual equivale a 66,67 % de trabajo operacional del equipo. El cordón de soldadura se puede apreciar en la figura 11.

Figura 11. Soldadura terminada de la carcasa del horno



Fuente: autor del proyecto

En las figuras 12 y 13 se muestran, respectivamente, la cabina de alimentación y el proceso de soldadura de sus elementos. Por factores tales como poco grosor, calidad y costo, durante la fabricación de la cabina, las láminas se soldaron con arco eléctrico con electrodo AWS E 6013.

Figura 12. Cabina de alimentación



Fuente: Autor del proyecto

Figura 13. Soldadura de elementos



Fuente: autor del proyecto

La figura 14 muestra dos cosas, la primera; el color óptimo que debe presentar la llama dentro del horno y la segunda la construcción de sus aspas internas en forma de espiral.

Figura 14. Brillo de llama y aspas del horno



Fuente: autor del proyecto

En la figura 15 se observa el horno en producción. El horno montado con sus dos cabinas de entrada y salida tiene una longitud total de 10 metros. Cuenta principalmente con su carcasa que está recubierta del aislante térmico

(refractario), la catalina y su sistema dentado, unido a una cadena que se mueve con un motor- reductor –variador de 3,5 HP.

Figura 15. Horno en producción



Fuente: autor del proyecto

6.2.3 Selección del refractario

Por la baja temperatura dentro del horno rotatorio para la calcinación de yeso, se usan refractarios que recubran exteriormente la carcasa metálica. Básicamente, la primera temperatura representa un valor mínimo de aproximadamente 26 °C; se considera mínima porque es la temperatura ambiente antes de encendido del horno. Luego de encendido el horno, su temperatura aumenta hasta alcanzar una última temperatura, con un valor máximo de 410°C cerca de la llama. En este rango de temperaturas se repiten ciclos de calentamiento-enfriamiento. Se considera que no hay alteración de la carcasa metálica con el yeso, debido al alto punto de fusión del metal, que se encuentra alrededor de 1048 °C.

Por tal motivo, el refractario seleccionado fue tela de fibra de vidrio de 5 mm de grosor (ver sus características en la tabla 8). La tela refractaria se coloca recubriendo la carcasa del horno y luego se recubre con una lámina galvanizada.

Tabla 8. Características del material aislante

Denominación	Propiedades
manta papel de fibra de vidrio sin revestimiento Kraft	conductividad térmica: 0,02 (KW/mK)
	Ancho: 100 mm, largo: 10 m y espesor: 5mm
	Densidad relativa : 3,5

Fuente: Suministrada por gerente de Procalco

6.3 MONTAJE DEL HORNO DE CALCINACIÓN DE YESO

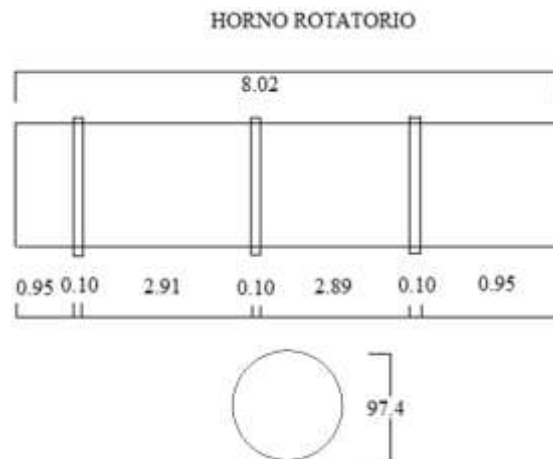
El nuevo horno rotatorio es de cargue periódico (por cochada), debido a que no se contaba con el presupuesto necesario para comprar una válvula de alimentación que regulara la entrada del material de una manera.

Para la rotación del horno se empleó un motor (variador-reductor), con las siguientes especificaciones:

- Marca: Toshiba
- Potencia Nominal: 3,5 HP
- Velocidad: 25 – 90 r.p.m.
- Corriente: alterna (220 V)

Luego de la fabricación del cuerpo del horno, éste quedo con las dimensiones mostradas en la figura 16.

Figura 16. Esquema del horno rotatorio

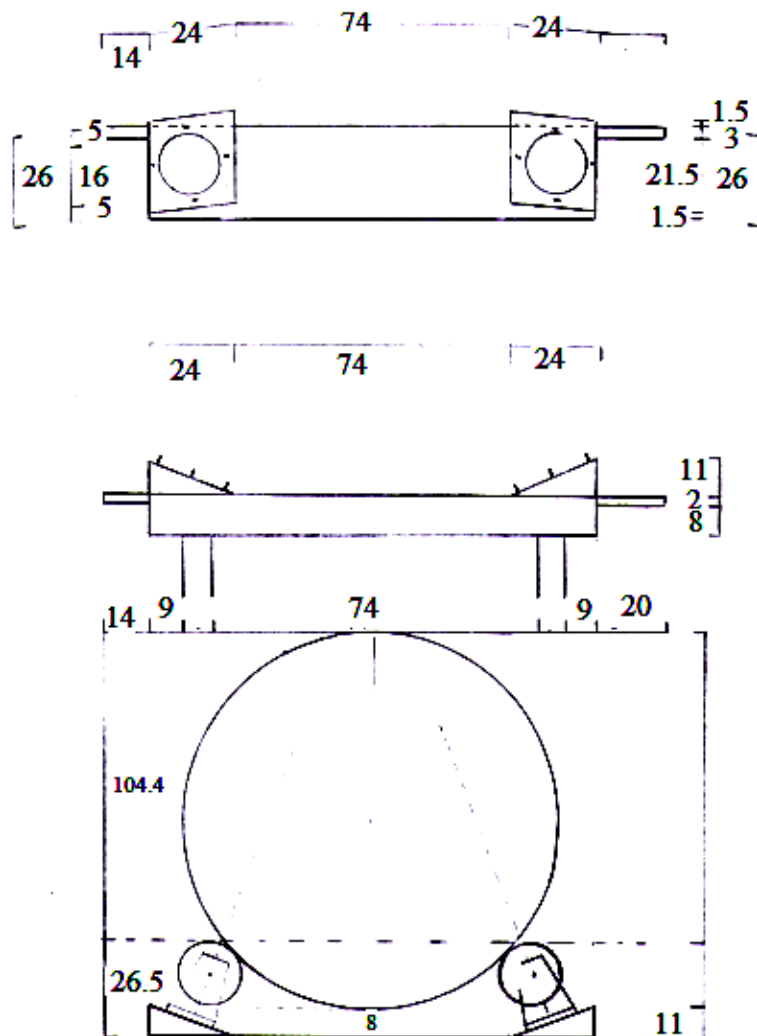


Fuente: Autor del proyecto

El horno fue montado en los soportes que se muestran en la figura 16 y posteriormente se forró con fibra de vidrio, la cual se recubrió con lámina de acero galvanizado. En la parte baja de la figura 17 se observa la vista frontal del tubo luego de ser recubierto. El cual es soportado por rodillos provenientes de un proceso de fundición. Luego de montaje, se procedió con la instalación de accesorios, como cabinas de entrada y salida, chimenea y sistema de mangas.

Figura 17. Soporte del horno.

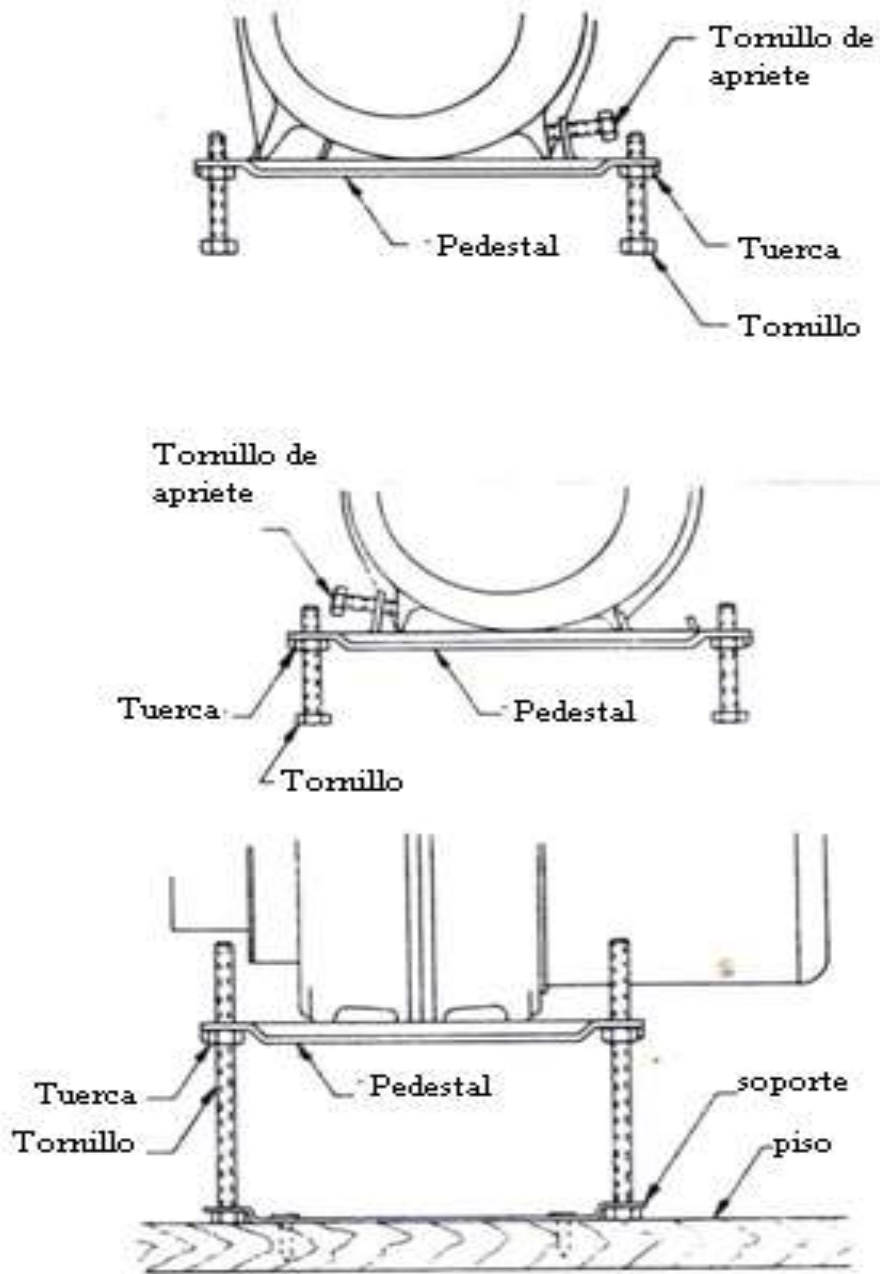
UNIDADES [cm]



Fuente: autor del proyecto

Después, se instaló el quemador como se muestra en la figura 18. La base del quemador se sujetó en un pedestal metálico. Se escogió un pedestal móvil para facilitar el mantenimiento y reparación del quemador.

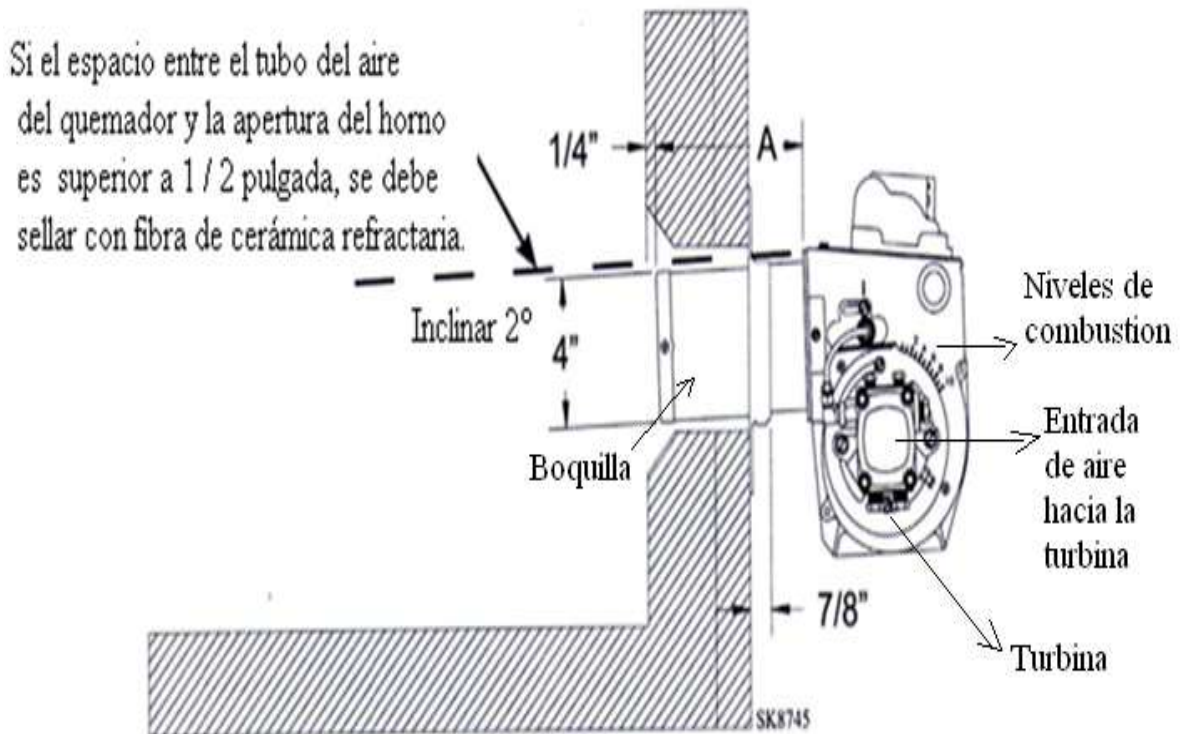
Figura 18. Forma de fijar el quemador



Fuente: Autor del proyecto

El siguiente paso consistió en acoplar el quemador al horno, tal como se muestra en la figura 19. El quemador cuenta con una boquilla de 4 pulgadas, la cual entra por un orificio de 5 pulgadas. En el espacio sobrante se colocó fibra de vidrio para minimizar las pérdidas de calor.

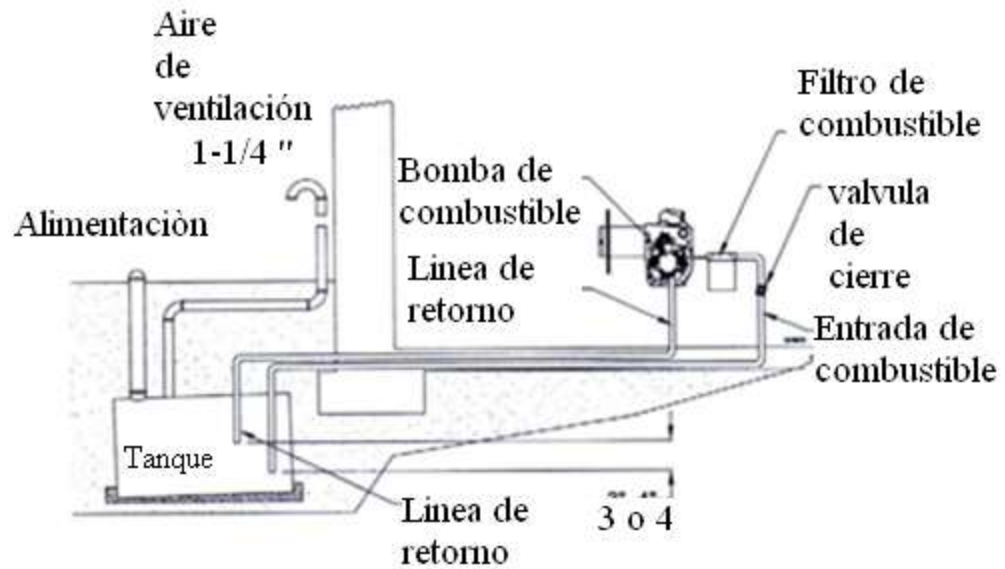
Figura 19. Esquema del quemador



Fuente: autor del proyecto

El sistema de acople del quemador se muestra en la figura 20. El quemador tiene dos entradas principales; una es la entrada de combustible y la otra es la alimentación eléctrica del quemador. La otra entrada indirecta es la alimentación de aire frío tomado de la atmosfera, que entra gracias a una turbina de 0.5 HP. Se denomina indirecta porque es interna del equipo y no requiere de comunicación directa de una fuente de alimentación.

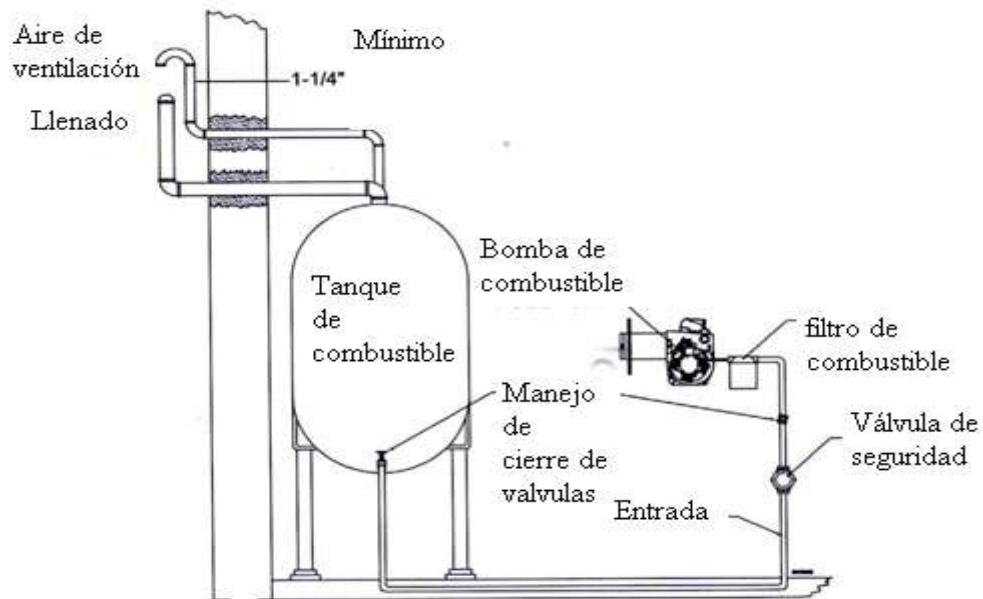
Figura 20. Sistema de acople del quemador



Fuente: autor del proyecto

El tanque de combustible que alimenta al quemador se muestra esquemáticamente en la figura 21.

Figura 21. Esquema del tanque de combustible que alimenta al quemador



Fuente: autor del proyecto

En la figura 22 se presenta una fotografía del horno terminado en funcionamiento en las instalaciones de PROCALCO.

Figura 22. Horno rotatorio en Producción



Fuente: Autor del proyecto

6.4 PUESTA EN MARCHA DEL HORNO ROTATORIO

El horno fue diseñado para funcionar bajo las siguientes condiciones:

- Capacidad de cargue: 12-15 Kg/min
- Velocidad de giro: 2-3 rev/min
- Temperatura máxima de calentamiento: ~410 °C
- Combustible: dual (Gas propano y ACPM).

Para la puesta en marcha del horno se realizaron dos estudios de variables características, y de las cuales depende su buen desempeño. A continuación se detallan los resultados de tales pruebas.

6.4.1 Estabilización de la carga y de la temperatura dentro del horno

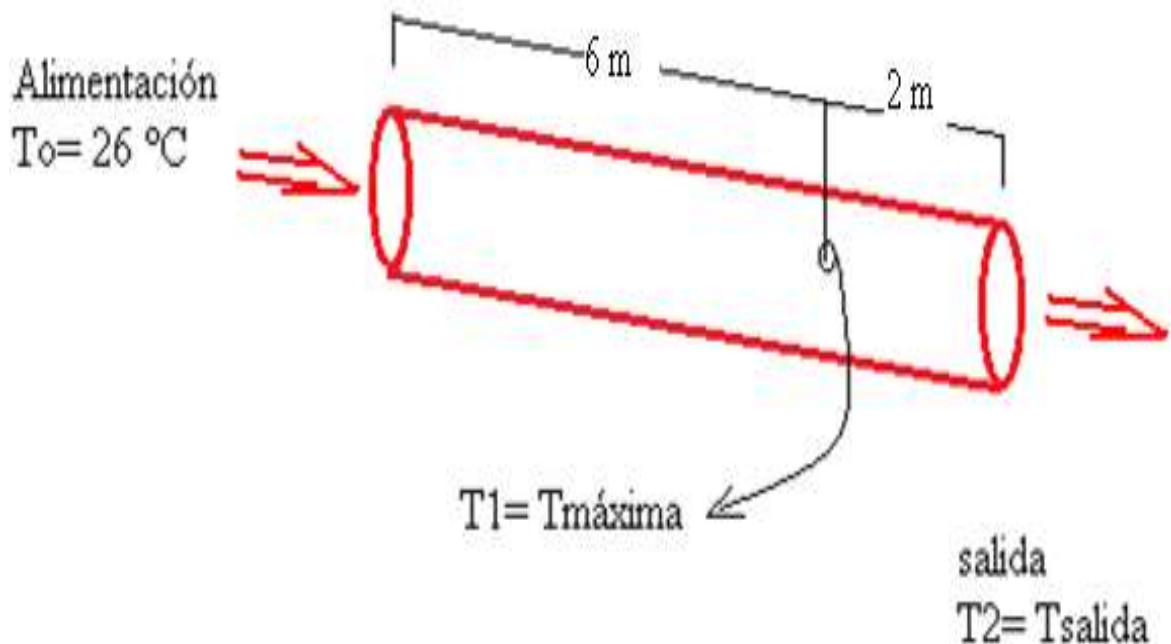
Teniendo en cuenta que el rango de temperatura necesario para la calcinación del yeso es de 160 °C a 180°C, en esta parte del trabajo se buscaba ajustar la velocidad de carga del horno de tal forma que la temperatura de salida del yeso estuviera en dicho rango. Tal como se observa en la figura 23, el control de la temperatura se hizo en dos puntos:

T1: Temperatura máxima en la salida del quemador, ubicada a una distancia de 2 m desde la salida del horno.

T2: Temperatura a la salida del horno.

Estas medidas de temperatura se hicieron con termocuplas tipo k.

Figura 23. Control de temperatura en el horno



Fuente: Autor del proyecto

En primer lugar se calibró el motor a una velocidad de 2,35 r.p.m, dado que experimentalmente se determinó que a dicha velocidad el mineral se movía adecuadamente dentro del horno.

Teniendo en cuenta las recomendaciones del manual de operación del quemador, el horno se precalentó durante 10 minutos, al cabo de los cuales se inició la carga del horno con 12 Kg. Se prosiguió con la carga del horno, incrementando ésta en 6 kg, tal como se muestra en la tabla 9. En dicha tabla también se muestra el tiempo de realización de cada carga y las temperaturas máxima (T1) y de salida (T2). Al llegar a una carga de 42 kg se obtuvo una temperatura de salida de 163 °C, la cual está dentro del rango de temperatura deseada. Tal temperatura está asociada con una temperatura máxima en el horno de 295 °C. Como se observa en la tabla 9, manteniendo constante la alimentación en 42 Kg cada 3 minutos se logra la estabilización de las temperaturas dentro del horno.

Tabla 9. Ajustes de temperatura y carga en el horno

N°	t (min)	T1 (°C)	T2 (°C)	Mineral (Kg)
0	0	45	27	0
1	10	350	35	12
2	12,3	341	38	18
3	15,3	325	41	24
4	18,3	312	102	30
5	21,3	305	159	36
6	24,3	295	163	42
7	27,3	295	163	42
8	30,3	296	164	42
9	33,3	295	163	42

Fuente: Autor del proyecto

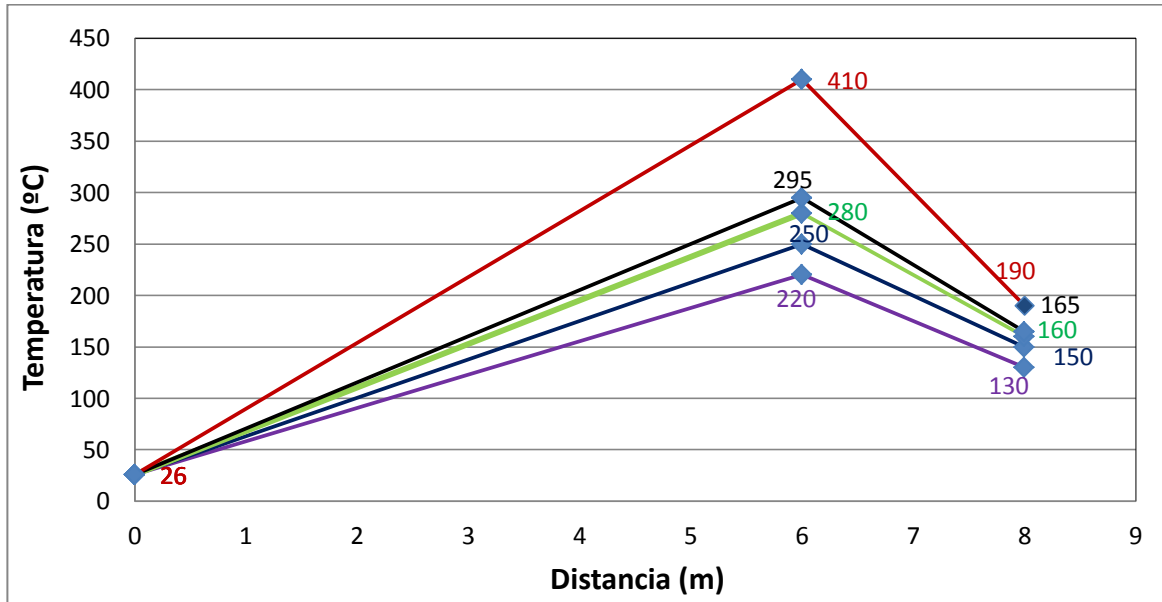
Teniendo en cuenta que el tiempo de residencia del mineral dentro del horno era de 9 minutos, cada cochada consistía de 3 cargas ó 126 Kg.

6.4.2 Influencia de la temperatura de calcinación en la calidad del yeso producido

Este estudio se realizó a nivel de laboratorio, pero teniendo en cuenta las temperaturas máxima y de salida establecidas por los niveles de control del

quemador, ver figura 24. La calcinación del mineral se realizó en un horno con control de temperatura y rampas de calentamiento.

Figura 24. Esquema de temperaturas dentro del horno dadas por el quemador.



Fuente: Autor del proyecto

En la tabla 10 se presentan las rampas de calentamiento y los ensayos de temperatura usados en cada ensayo. El tiempo de sostenimiento a la temperatura máxima fue 1 minuto, completándose 9 minutos de calcinación, tal como se aprecia en la figura 25.

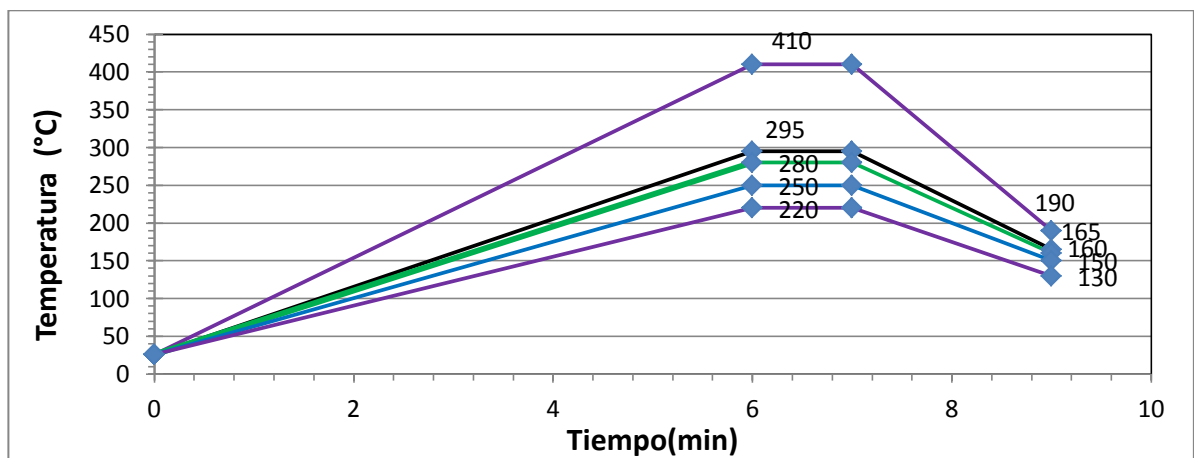
Tabla 10. Ensayos de calcinación a nivel de laboratorio

N° Ensayo	Temperatura máxima suministrada por quemador	Temperatura de salida	Rampas de calentamiento (°C/min)
1	220	130	32.3 (26-220 °C)
			45 (220-130 °C)
2	250	150	37.3 (26-250 °C)

			50 (250-150 °C)
3	280	160	42.3 (26-280 °C)
			60 (280-160)
4	295	165	44.8 (26-295°C)
			65 (295-165 °C)
5	410	190	64 (26-410°C)
			110 (410-190 °C)

Fuente. Autor del proyecto

Figura 25. Gráfico de tasas de calentamiento (temperatura vs tiempo)



Fuente. Autor del proyecto

En la tabla 11 se resumen los resultados del estudio de calcinación del mineral de yeso, y en la figura 26 se presentan las fotografías de los productos de calcinación de cada ensayo. El yeso de construcción tiene como principales requisitos: tener una tonalidad homogénea y blanca, tiempo de endurecimiento entre 15 y 20 minutos (para yeso estuco), tiempo de fraguado total de 30 minutos, así como presentar una elevación de temperatura del medio superior a 20 °C [Norma IRAM 1607].

Tabla 11. Resultados del estudio de calcinación

ENSAYO	% SO ₃	OBSERVACIONES (ver figura 26)
0 (mineral sin calcinar)	41.8	Buena materia prima para empezar el proceso, teniendo en cuenta que el SO ₃ contenido en una muestra ideal es máximo 58%. No aglomera al adicionar agua, ni presenta

		fraguado.
1	51.8	Presenta partes no homogéneas (calcinación incompleta), fraguado nulo. No hay aglomeración.
2	52.3	Aglomeración de pequeñas masas dispersas en la mezcla yeso- agua, Calcinación incompleta.
3	53.4	Formación de una masa no compacta que se deja desmoronar y fraguado dudoso por la presencia superficial untosa (el yeso superficial esta crudo y no fragua bien). Acabado superficial regular y desmolde con dificultad.
4	54.2	Muy buena muestra, masa compacta. Con dureza y a su vez fragilidad. Acabado superficial excelente cuando se moldea. Fraguado rápido y con liberación espontánea de calor.
5	56.1	Excelente en cuanto a %SO ₃ , pero fraguado lento y color opaco (crema). Masa con mayor dureza que las anteriores.

Fuente: autor del proyecto

Figura 26. Fotografías de los productos de calcinación del mineral de yeso



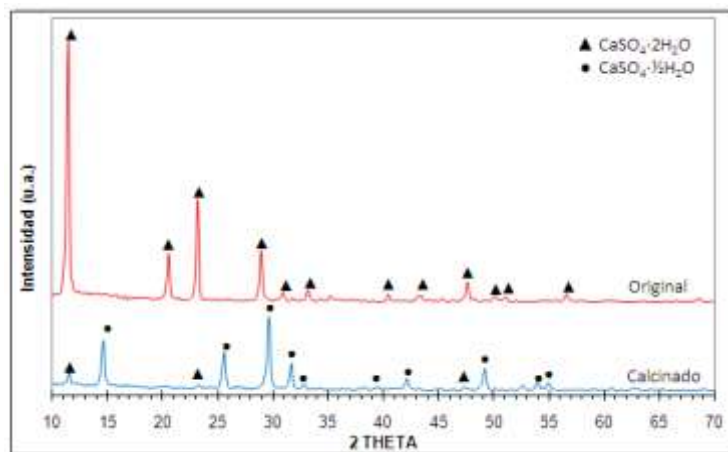
Fuente: Autor del proyecto

Como era de esperarse, a medida que se aumenta la temperatura de calcinación se aumenta el contenido de SO₃ en el yeso, lo cual está relacionado con la deshidratación del mineral. Este aumento del contenido de SO₃ es acompañado

por un aumento en la velocidad de fraguado y el blanqueo del mineral. Lo anterior es cierto para los 4 primeros ensayos, sin embargo, el comportamiento al fraguado del producto de calcinación del ensayo 5 desmejora con respecto al ensayo 4, lo cual puede estar relacionado con una excesiva deshidratación del yeso. Teniendo en cuenta lo anterior, se seleccionan las condiciones de calcinación del ensayo 4 como las más adecuadas. En este sentido, las condiciones de temperatura apropiadas para el funcionamiento del horno son: temperatura máxima de 295 °C y temperatura de salida de 165°C. Bajo tales condiciones se obtiene un yeso blanco, con propiedades aglutinantes, contenido de SO₃ de aproximadamente 54.2 % y fraguado rápido (15 a 20 minutos).

En la figura 27 se presentan los análisis de difracción de rayos x de la muestra original y del producto de calcinación del ensayo 4. Los picos del difractograma del mineral original corresponden a los patrones de difracción del yeso di-hidratado (CaSO₄·2H₂O), mientras que en el difractograma del mineral calcinado tales picos pierden intensidad y sobresalen los del yeso semi-hidratado (CaSO₄·1/2H₂O). Estos resultados corroboran la calidad del yeso calcinado.

Figura 27. Difractogramas del mineral original y del producto de calcinación del ensayo 4.



Fuente: Difractómetro de rayos x, Universidad de Antioquia (Medellín)

6.5. PROPUESTA DE DISEÑO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DEL MINERAL DE YESO

Teniendo en cuenta las recomendaciones de la CDMB, la planta arquitectónica consistió de un espacio cerrado de 10.40 m x 24.20 m, es decir con un área de 251.68 m². Tal encerramiento conlleva a un menor impacto ambiental, así como a un mayor aprovechamiento de la energía térmica en el horno, porque al encerrar la fábrica se disminuyen las pérdidas energéticas por transferencia de calor causadas por agentes externos como el viento y cambios de climas que influyen en la temperatura.

A continuación se describe la disposición de equipos en la planta.

6.5.1. Organización de la planta

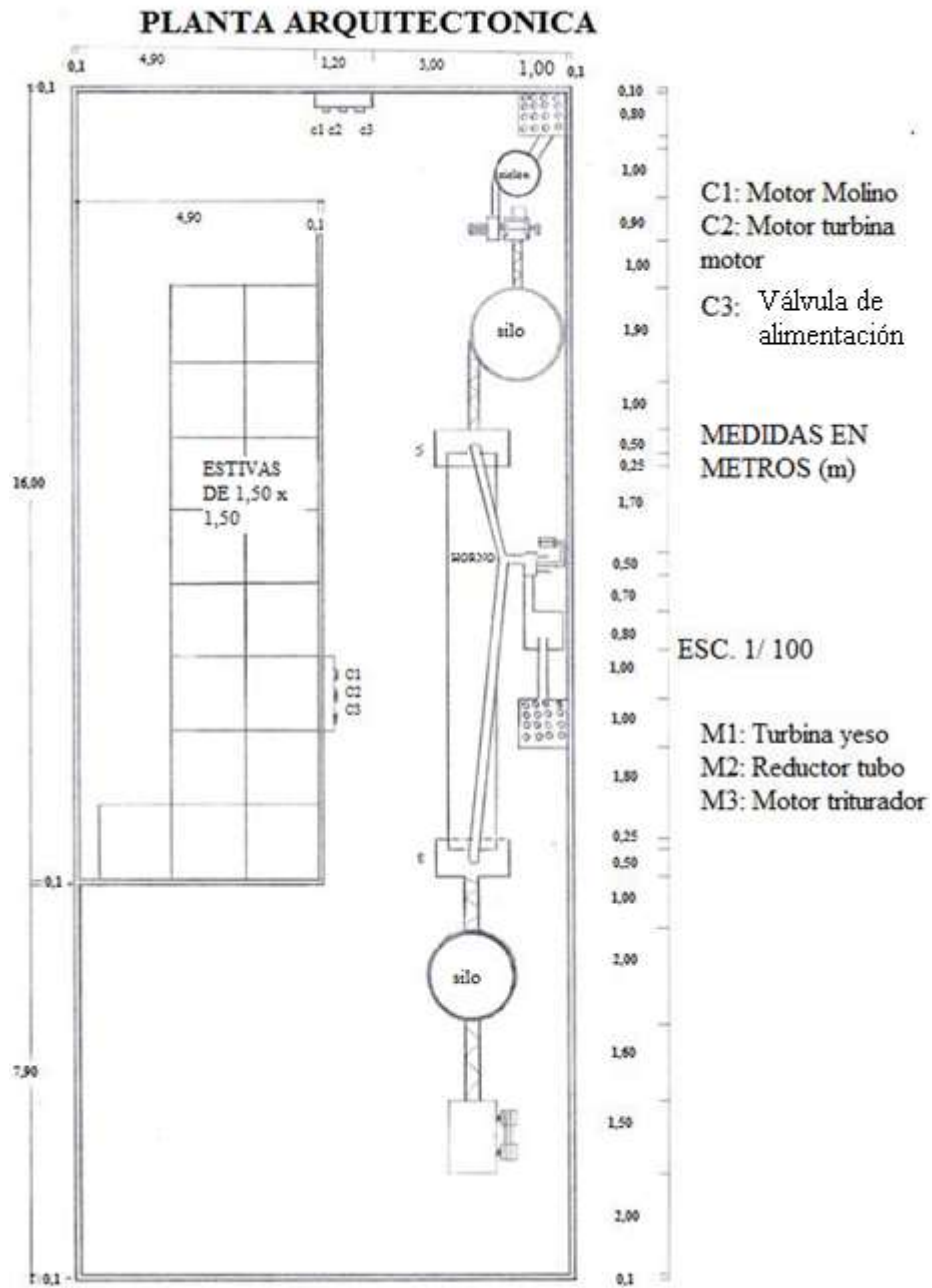
La organización de la planta se muestra en la figura 28. En primer lugar, se tiene una zona de descargue del mineral (con $D_p = 3$ mm), el cual alimenta al molino de martillos, con el cual se reduce el tamaño de partícula hasta un D_p de 1 mm. Con ayuda de un transportador helicoidal se transporta el mineral molido hasta un silo de almacenamiento, el cual alimenta el horno rotatorio con ayuda de una válvula de alimentación continua. El material que sale del horno es recibido por un segundo transportador helicoidal, que lo lleva a un silo. El mineral calcinado es molido en molino de martillos, alcanzando un D_p final de 0,5 mm y posteriormente almacenado en otro silo. El producto final es empacado en sacos, con un peso final de 25 kg (ver figura 29).

Tales bultos se transportan a la zona de almacenamiento, en donde se estiva en arrumes de 20 a 25 filas para el cargue, transporte y distribución.

Para optimizar los espacios se recomienda que los arrumes no sean menores de 20 filas. Sin embargo, tampoco se recomienda arrumes de más de 25 filas, por la

compresión de sobrepeso del material, que ocasiona que éste se compacte y genere grumos, los cuales disminuyen la calidad del yeso cuando es almacenado por un tiempo superior a 40 días.

Figura 28. Planta de procesamiento del mineral de yeso.



Fuente: Autor del proyecto.

Figura 29. Almacenamiento de yeso en estivas.

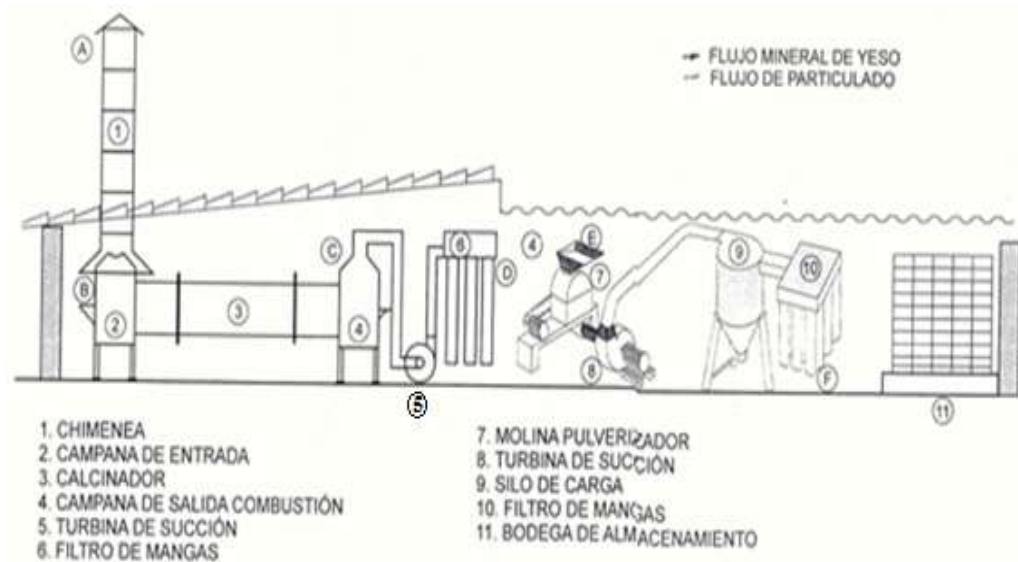


Fuente: autor del proyecto

6.5.2 Control de emisiones en la planta

En la figura 30 se presenta el diseño de control de emisiones de la planta, el cual consta de una chimenea ubicada en el calcinador y de un sistema neumático cerrado (turbina + filtro de mangas), ubicado en la etapa de pulverización.

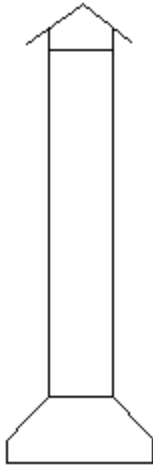
Figura 30. Diseño de control de emisiones de la planta



Fuente: autor del proyecto

A continuación se describen los dispositivos usados para el control de emisiones.

PUNTO A: CHIMENEA



Material: Estructura angular en lámina de acero para trabajo en caliente calibre 14.

Dimensiones: diámetro: 0,06m

Longitud: 4,00 m

Altura nivel de la tierra: 7,50 m

Tipo de mantenimiento: correctivo (Cambio total).

FUNCIÓN: servir como elemento de conducción del vapor de agua por tiraje inducido.

PUNTO B: CAMPANA ENTRADA



Material: Estructura angular en lámina de acero para trabajo en caliente calibre 14.

Dimensiones: (1,4x0,8x1,4) m

Tipo de mantenimiento: preventivo

Ubicación: calcinador

FUNCIÓN: Confina el vapor para enviarlo directamente a la chimenea.

PUNTO C: CAMPANA DE SALIDA



Material: Estructura angular en lámina de acero para trabajo en caliente calibre 14.

Dimensiones: (1.4x0.8x1.4) m

Tipo de mantenimiento: preventivo

Ubicación: calcinador

FUNCIÓN: Confina, además de vapor, los productos de combustión del calcinador y los envía hacia el filtro de mangas.

PUNTO D: FILTRO DE MANGAS



Material Caja: lamina de acero para trabajo en caliente calibre 14.

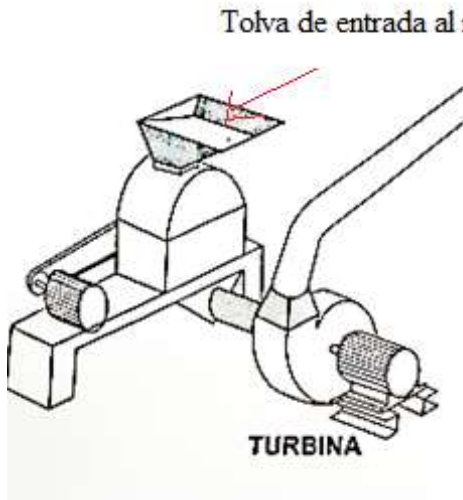
Dimensiones: (1.2x1.4x0.3) m

Tipo de mantenimiento: preventivo (fugas)

Ubicación: línea calcinador.

FUNCIÓN: Servir como medio de captación del mineral particulado y de gases de combustión.

PUNTO E: TOLVA DE ENTRADA AL MOLINO



Material: acero laminado en caliente

Tipo de mantenimiento: preventivo (fugas)

Ubicación: molino pulverizador.

FUNCIÓN: conduce el material calcinado al molino para su pulverización. La turbina ubicada en el punto 8 succiona el mineral de la tolva.

PUNTO F: FILTRO DE MANGAS EN EL MOLINO



Material Caja: lámina de acero para trabajo en caliente calibre 14.

Dimensiones: (1.2x1.2x0.3) m

Tipo de mantenimiento: preventivo (fugas)

Ubicación: molino pulverizador.

FUNCIÓN: actúa como medio de captación de los polvos generados en la línea de pulverización.

Los polvos son succionados de la campana de combustión, con la ayuda de una turbina, enviando el particulado y los productos de la combustión hacia el filtro de mangas.

➤ **Especificaciones de la turbina:**

Turbina de succión: motor de 15 hp y 2200 rpm

Dimensiones filtro: 1,2 x 1,5 x 0,5 m

Dimensiones mangas: longitud: 3 metros

Diámetro: 10 pulgadas

Material: tela tipo DRRIL SUPER 8.

Material: filtro: lámina para trabajo en caliente (HR) calibre 14

Este sistema de filtración permite recolectar 100 kg/día de particulado, lo que equivale a aproximadamente a 2 toneladas mensuales.

➤ **Manejo de partículas recolectadas**

Este material confinado es rico en calcio y azufre. El azufre es un componente de las proteínas de las plantas y el calcio es necesario para el desarrollo de las células, mejorando la rigidez del tallo y la producción de granos; por ello se usa como fertilizante agrícola.

Las campanas 2 y 4 (ver Figura 30) tienen una función concreta en cada uno de los extremos del calcinador. Al ser de un volumen rectangular definido, permite concentrar dentro de ellas las emisiones de productos de calcinación, tales como vapor de agua y partículas finas de yeso.

La campana de entrada 2 del calcinador está dentro de un mayor volumen conectada a la chimenea cuyo tiraje induce al ascenso de los productos de la calcinación (vapor agua + partículas finas).

6.5.3 Diseño térmico del horno calcinador

En esta parte del trabajo se pretendió determinar los parámetros operacionales relacionados con el consumo energético dentro del horno, tales como flujos de aire y de combustible consumidos y de gases producidos. Tales parámetros se determinaron de forma teórica con ayuda de relaciones semi-empíricas encontradas en la bibliografía, y que son comúnmente aceptadas para el diseño de hornos.

En el Anexo 3 se aclara el significado de cada una de las variables utilizadas en los cálculos.

El peso máximo de yeso a calcinar son 720 kg/h, cuando el horno funciona con ACPM y 900 kg/h, cuando el horno opera con gas propano (GLP). Estos valores se obtuvieron de manera empírica en producción en PROCALCO.

Calor neto necesario (Q_n) = calor absorbido por la carga (Q_c) + calor perdido por las paredes (Q_p) + calor perdido en los gases (Q_g).

$$Q_n = Q_c + Q_p + Q_g$$

El calor que se pierde por las paredes involucra el calor de convección y de radiación.

➤ **COMBUSTIBLES**

Se usa como combustible ACPM y gas propano, con el propósito de obtener dos tipos de calidad de yeso. Cuando se trabaja con ACPM se obtiene yeso con un contenido de carbono que le confiere un grado de opacidad al yeso, debido al hollín que el ACPM produce en el proceso. Por su parte, al usar como combustible gas propano, se obtiene un producto más blanco y puro. El sistema dual líquido – gas se usa mientras hay una adaptación en el mercado, pues con gas se mejora la calidad, pero se incrementa el costo de producción.

Tanto en el sistema de ACPM como en el de gas propano, los fluidos presentan baja viscosidad y no necesitan de precalentamiento para su atomización en el quemador. A continuación se describen los cálculos energéticos en el horno usando como combustible ACPM.

Las características suministradas por la compañía colombiana de distribuidores (CODI) acerca de este combustible, producido en las refinerías de Barrancabermeja y Cartagena, se presentan en la tabla 12.

Tabla 12. Características del ACPM Colombiano

	Barrancabermeja	Cartagena
Gravedad API a 68 °F	31,6	31
Densidad Relativa 60/60	0,8676	0,8708
Punto de chispa	200	150
Viscosidad S.V a 100 °F	39	41
% de azufre	0,35	0,49
Numero de cetano	42,5	45,5
Indicé Diesel	43	45,7
Poder calorífico Hi(Btu/Lb)	19,702	19,681
Punto inicial de Ebullición °F	416	421
Punto final de ebullición °F	636	672

Los cálculos se hicieron con base en la información del ACPM producido en Barrancabermeja porque es el que se utiliza en esta región.

Poder calorífico (Hi) = kcal/kg (bruto)

$$Hi = 19702 \frac{\text{Btu}}{\text{lb}} \times \frac{2,2 \text{ lb}}{\text{kg}} \times \frac{\text{kcal}}{3,968 \text{ Btu}} = 10923,5 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$$

a) Volumen de aire mínimo (VAM)

Con base en datos estadísticos para combustibles líquidos con poder calorífico entre 9700 y 11300 kcal/kg, se calcula el volumen de aire necesario para la combustión de la siguiente manera, según referencia [6].

$$\text{Volumen Aire Mínimo} = \text{VAM} = \left(\frac{0,85}{1000} \right) (Hi) + 2 = \frac{\text{m}^3 - \text{moles} - \text{aire}}{\text{kg combustible}}$$

$$\text{VAM} = \frac{0,85}{1000} (10923,5) + 2 = 11,285 \frac{\text{m}^3 - \text{moles} - \text{aire}}{\text{kg combustible}}$$

b) Volumen de gases mínimos (VGM)

De acuerdo con las relaciones semi-empíricas de la referencia [7], el volumen de gases mínimo producido en una combustión usando combustible líquido es:

$$VGM = \frac{1,11}{1000} (Hi) = (1,11/1000) (10923,5) = 12,125 \frac{\text{m}^3 - \text{n} - \text{gas}}{\text{kg comb.}}$$

c) Volumen real de aire (VA)

Para garantizar la combustión completa se requiere una cantidad de aire mayor que la cantidad estequiometría (mínima) de aire, lo cual se representa por un exceso de aire que para este caso depende de un factor de aire designado por λ que se asume para la combustión.

Para combustibles líquidos se recomiendan valores de λ que varían entre 1.1 y 1.5, según referencia [8]. El exceso de aire necesario es diferente para cada cámara de combustión, dependiendo de las características y diseño del quemador. Se adopta un $\lambda = 1.1$, porque se necesita una temperatura de combustión baja.

$$\text{Volumen de aire real} = VA = \lambda * VAM$$

$$VA = (1.1) \times (11,285) = 12,41 \frac{\text{m}^3 - \text{n} - \text{aire}}{\text{Kg combustible}}$$

d) Volumen real de los gases por kg de combustible (VG)

Como se aumentó la cantidad de aire (por el exceso); se aumentó el volumen de los gases.

$$\text{Exceso de aire} = (\lambda - 1) VAM$$

$$\text{Volumen real de los gases} = VG = VGM + (\lambda - 1)VAM$$

$$VG = 12,125 + (1,1 - 1,0) 11,285 = 13,25 \frac{\text{m}^3 - \text{n} - \text{gas}}{\text{kg combustible}}$$

e) Cálculo de la velocidad de la partícula (Vt)

Se determina según la referencia [9]:

$$V_t = \frac{(\rho_s - \rho) * g * D_p^2}{18 * \mu} = \frac{Ft}{s}$$

ρ_s = Densidad del mineral (lb/pie³) = 144,83 lb/pie³

ρ = Densidad de los gases de combustión a condiciones de presión del lugar.

g = Gravedad = 32,2 Ft/s²

D_p = Diámetro mínimo de la partícula $6,9 \times 10^{-4}$ Ft

μ = Viscosidad del gas = 0,03 centipoises

Calculo de ρ_e = Densidad a condiciones estándar se calcula según referencia [6] así:

$$\rho_e = \frac{39.7}{T + 460}$$

T = Temperatura media del gas

$$T = \frac{295 + 165}{2} = 230 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\rho_e = \frac{39.7}{230 + 460} = 0,058 \frac{\text{lb}}{\text{Ft}^3}$$

Presión atmosférica en Bucaramanga= 13 Psi

$$\rho = 0,058 * \frac{13}{14,7} = 0,05 \frac{\text{lb}}{\text{Ft}^3}$$

$$V_t = \frac{(144,83 - 0,05) * 32,2 * (6,9 \times 10^{-4})^2}{18 * 3 * 10^{-2} * 6,72 * 10^{-4}} = 6,12 \frac{\text{Ft}}{\text{s}}$$

f) Cálculo del flujo másico de los gases (Gv)

Según la referencia [9]:

$$G_v = \frac{V_t * P * M}{R * T}$$

Vt= Velocidad admisible de la partícula del mineral= 6,95 Ft/s.

P= Presión atmosférica del lugar= 13 Psi

M= Peso Molecular de los gases de secado, aproximadamente 29 lb/mol

R= Constante de los gases = 10,73

T= Temperatura media de los gases

Te= Temp. Entrada de los gases

Ts= Temp. Salida de los gases

Ts= 163°C Te=295°C

$$T_m = \frac{295+163^\circ\text{C}}{2} = 229^\circ\text{C}$$

$$T_m = 412,2^\circ\text{F} + 460 = 872,2^\circ\text{R}$$

$$G_v = \frac{6,95 \times 13 \times 3600 \times 29}{10,73 \times 872,2} = 1007,9 \frac{\text{lb}}{\text{hPie}^2}$$

g) Cálculo del coeficiente global de transferencia de calor a la carga (U_A)

El coeficiente global se calcula mediante la siguiente relación, de acuerdo a la referencia [9]:

$$U_A = \frac{0,477(n_f - 1)}{2D} (G_v)^{0,46}$$

nf= # de aletas

D= φ del horno= 3,1069 pies

Gv= Flujo másico= lbs/h Pie²

$$U_A = \frac{0,477(4 - 1)(370^{0,46})}{2(319,55)} = 0.034 \frac{\text{Btu}}{\text{h} - \text{pie}^3 - ^\circ\text{F}}$$

h) Flujo de gases que entran al horno

$$\dot{m}_G = G_v \pi r^2$$

$$\dot{m}_G = 1007,9 \pi (1,55)^2 \frac{\text{lb gases}}{\text{hora} - \text{Pie}^2} \times \text{pie}^2$$

$$\dot{m}_G = 7641,48 \frac{\text{lb gases}}{\text{hora}}$$

i) Volumen de gases en el horno (V_g)

Cantidad de gases de combustión que se producen por hora.

$$V_g = \frac{m_G}{\rho} = \frac{7641,48 \text{ lb gases/h}}{0,0145 \text{ lb/Pie}^3} = 527 \frac{\text{Pie}^3}{\text{h}} = 14,9 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

j) Entalpía de los gases (I_g)

Como el aire y el combustible que se usan en la combustión no se precalientan; entonces la entalpía de los gases de combustión se calcula de la siguiente manera:

$$I_g = \frac{H_i}{VG}$$

H_i = Poder calorífico combustible = 10923,5 kcal/kg

$$VG = \text{volumen real de gases} = 9,5 \frac{\text{m}^3 - n - \text{gas}}{\text{kg comb.}}$$

$\text{m}^3 - n - \text{gas}$ = metros cúbicos normales de gases

$$\frac{\text{m}^3 - n - \text{gas}}{\text{kg comb.}} = \text{metros cúbicos normales de gases por kg de combustible}$$

$$I_g = \frac{10923,5}{9,5} = \frac{\text{kcal/kg}}{\text{m}^3 - n - \frac{\text{gas}}{\text{kg}} \text{ comb}} = 614,71 \frac{\text{k cal}}{\text{m}^3 - n - \text{gas}}$$

k) Exceso de aire en los gases (%E)

$$\%E = (\lambda - 1) \frac{V_{AM}}{VG} * 100 = (1,1 - 1) \frac{11,285 \frac{\text{m}^3 - n - \text{aire}}{\text{kg combustible}}}{9,5 \frac{\text{m}^3 - n - \text{gas}}{\text{kg comb.}}} * 100 = 11,87\%$$

l) Consumo volumétrico de combustible (B_v)

$$B_v = \frac{B}{\rho} \quad \text{Densidad de combustible} = 0.87 \text{ kg/dm}^3$$

$$B_v = \frac{4,45}{0,87} = 5,115 \frac{\text{dm}^3}{\text{h}} \approx 5,2 \frac{\text{dm}^3}{\text{h}}$$

$$1 \text{ galón} = 3,785 \text{ dm}^3$$

$$B_v = \frac{5,2}{3,785} = 1,37 \frac{\text{galones}}{\text{hora}}$$

m) Flujo volumétrico de gases (Vgc)

Se calculara el volumen que se produce en base al consumo de combustible del horno diseñado.

$$V_{gc} = B \cdot V_G$$

$$V_{gc} = 4,45 * 9,5 \frac{\text{kg}}{\text{comb}} \cdot \frac{\text{m}^3 - \text{n} - \text{gas}}{\text{kg/comb}} = 42,27 \frac{\text{m}^3 - \text{n} - \text{gas}}{\text{h}}$$

6.5.4 cálculo de la potencia necesaria para rotar el horno calcinador

A continuación se presentan los cálculos realizados para determinar la potencia del motor necesaria para la rotación del horno. Para mayor claridad del significado de cada variable, ver el glosario del Anexo 3.

La potencia es consumida por la inercia de las masas y por la fricción entre los rodillos que están en contacto y presentan movimiento uno con otro.

La velocidad de giro establecida es de 2,15 r.p.m

Peso de la carga de mineral a calcinar = 42 kg

a) Peso del horno

El peso del horno es básicamente la carcasa metálica, el aislante térmico (refractario), las láminas de acero galvanizado que recubren el refractario y las catalinas.

$$P_h = P_{CM} + P_r + P_c + P_a$$

PESO CARCASA METALICA (P_{CM})

Se refiere a las ocho láminas soldadas que conforman el tubo. Cada lámina pesa 94,2 kg para un total de:

$$P_{CM} = 8 \cdot 94,2 \text{ kg} + 28 \text{ kg de soldadura} + 9,54 \text{ kg ángulo y aspas}$$

$$P_{CM} = 791,14 \text{ kg}$$

$$\text{PESO TOTAL DEL REFRACTARIO } (P_r) = 12 \text{ kg}$$

$$\text{PESO CATALINA } (P_c) = 52 \text{ kg}$$

$$\text{PESO DE ANILLOS } (P_a) = 2 \cdot 24,5 \text{ kg} \approx 50 \text{ kg}$$

$$P_h = 991,14 + 12 + 52 + 50 = 1105,14 \text{ kg}$$

b) Momento de inercia de la carga (Ic). Ver la figura 31

Para el cálculo del radio de giro se recomienda realizarlo de la siguiente manera, según referencia [6].

$$\text{Volumen de mineral seco} = 42000 \text{ g} / (2,32 \text{ g/cm}^3) = 18103,44 \text{ cm}^3$$

$$\text{Longitud cilindro} = L = 802 \text{ cm}$$

$$\text{Área de segmento} = \frac{\text{Volumen de mineral seco}}{L} = \frac{18103,44}{802} = 22,57 \text{ cm}^2$$

$$D = \text{Diámetro interior del cilindro} = 94,7 \text{ cm}$$

$$\frac{\text{Area de segmento}}{D^2} = \frac{22,57 \text{ cm}^2}{(94,7 \text{ cm})^2} = 0,0025$$

Con el valor 0,0025 se seleccionan los valores de h/D , α y cuerda/D con las tablas del manual del ingeniero mecánico de Mark [3]:

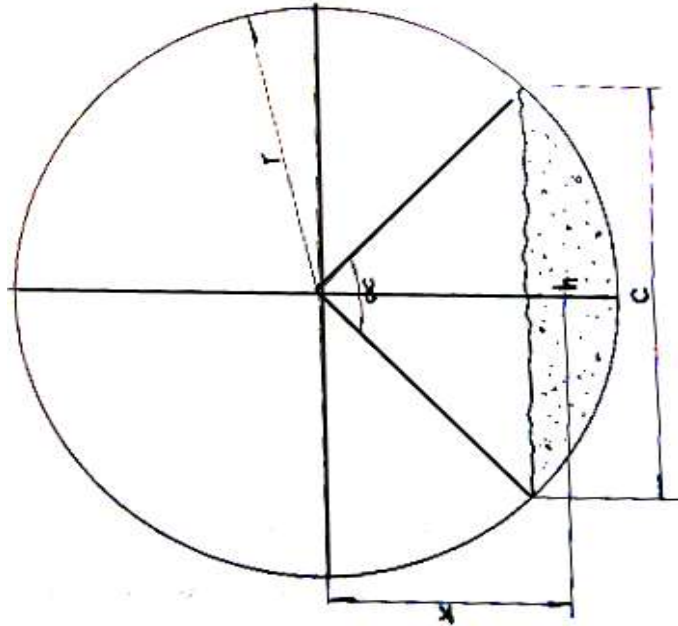
$$\frac{h}{D} = 0,352 ; \alpha = 95^\circ ; \frac{\text{cuerda}}{D} = 0,96$$

Entonces:

$$H = 0,352 \cdot 94,7 \text{ cm} = 33,33 \text{ cm}$$

$$C = 94,7 \cdot 0,96 = 90,912 \text{ cm}$$

Figura 31. Variables que intervienen en el cálculo del momento de inercia.



Fuente: autor del proyecto

$$\text{Radio de Giro} = K = \frac{2\pi r \text{sen}^3 \frac{\alpha}{2}}{3 \frac{\alpha}{2} * \text{rad} - \cos \frac{\alpha}{2} * \text{sen} \frac{\alpha}{2}}$$

$$K = \frac{2}{3} \frac{(0,4735) \text{sen}^3 \frac{95}{2}}{\frac{95}{2} * \frac{\pi \text{ rad}}{180} - \cos \frac{95}{2} * \text{sen} \frac{95}{2}} = 0,382 \text{ m} = 38,22 \text{ cm}$$

Como: $I = mK^2$ y $m = 42 \text{ kg}$, entonces:

$$I_c = 42 * (0,382)^2 = 6,12 \text{ kg-m-s}^2$$

c) Momento de inercia del refractario (I_r)

$$I_r = mK^2$$

$m = \text{masa del refractario} = 12 \text{ kg}$

$$K = \text{Radio de giro} = \frac{r_i + r_e}{2}$$

$r_i = \text{Radio del horno} + \text{grosor de la lámina} = 0,487\text{m} + 4 \times 10^{-3}\text{m} = 0,491\text{m}$

$r_i = \text{Radio interior del refractario} = 0,491\text{m}$

$r_e = r_i + \text{grosor del refractario} = 0,491\text{ m} + 5 \times 10^{-3}\text{ m}$

$r_e = \text{Radio exterior del refractario} = 0,496\text{m}$

$$K = \frac{0,491 + 0,496}{2} = 0,4935\text{ m}$$

$$I_r = 12 \cdot (0,4935)^2 = 2,923\text{ kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^2$$

d) Momento de inercia del casco metálico (I_L)

$$I_L = mK^2$$

$m = \text{masa del casco metálico} = 791,14\text{ kg}$

$r_i = \text{Radio interior del cilindro} = 0,487\text{ m}$

$r_e = \text{Radio exterior del cilindro} = 0,491\text{ m}$

$$K = \frac{0,487 + 0,491}{2} = 0,489$$

$$I_L = 791,14 (0,489)^2 = 189,178\text{ Kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^2$$

e) Momento de inercia de la catalina (I_c)

$$I_c = mK^2$$

$m = \text{masa de la catalina} = 52\text{ kg}$

$r_i = \text{Radio interior de la catalina} = 0,491\text{m}$

$r_e = \text{Radio exterior de la catalina} = 0,497\text{m}$

$$K = 0,494\text{ m}$$

$$I_c = 52 (0,494)^2 = 12,69\text{ Kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^2$$

f) Momento de inercia de los anillos (I_a)

$$I_a = mK^2$$

$r_i = \text{Radio interior de los anillos} = 0,491\text{m}$

$r_e = \text{Radio exterior de los anillos} = 0,517\text{m}$

$$K = 0,504\text{ m}$$

$$I_a = 50 (0,504)^2 = 12,7\text{ Kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^2$$

g) Momento de inercia total

$$I_t = I_r + I_L + I_c + I_a = 2,923 + 189,178 + 12,69 + 12,7 = 217,491 \text{ Kg-m-s}^2$$

h) Cálculo de la aceleración angular (α)

$$\alpha = \frac{W}{t} = \frac{\text{rad}}{\text{seg}^2}$$

W = Velocidad angular (rad/seg)

t = Tiempo de arranque (seg) = se asume 1 segundo mientras alcanza la velocidad de trabajo

n = Velocidad de rotación del horno = 2,35 r.p.m

$$W = 2\pi n = 2\pi(2,35) = 4,3\pi \frac{\text{rad}}{\text{min}} * \frac{\text{min}}{60 \text{ s}} = 0,246 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

$$\alpha = \frac{0,246 \text{ rad/s}}{1 \text{ s}} = 0,246 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$$

i) Potencia consumida por la inercia de las masas (Pot)

$$\text{Pot} = Tn/63000$$

$$T = I_t * \alpha$$

$$T = 217,491 \text{ Kg-m-s}^2 * 0,246 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2} = 53,503 \text{ kg-m} = 4643,85 \text{ lb-plg}$$

$$\text{Pot} = \frac{4643,85 * 2}{63000} = 0,147 \text{ HP}$$

Según referencia [6] Pot representa el 13,15% de la potencia total

Pf= potencia consumida por fricción=0,978 HP

Teniendo en cuenta un factor de seguridad de N=3 se tiene 2,934 por lo que se seleccionó un motor de 3,5 HP.

7. CONCLUSIONES

- A través de la caracterización granulométrica y química de varias de las corrientes durante el procesamiento de mineral de yeso en la planta de Procalco, se pudo determinar que las etapas de molienda-clasificación establecidas son las adecuadas para la obtención de yeso de alta calidad.
- Gracias al balance de materia realizado, se pudo establecer que durante la calcinación del mineral de yeso se pierde cerca de un 0,1% de mineral fino (0,012 Tn/día), el cual es recuperado por los filtros de manga. Por la importante cantidad de material fino recuperado y sus características químicas, podría comercializarse como fertilizante agrícola.
- Teniendo en cuenta los requerimientos técnicos, tales como resistencia a la abrasión, dureza, ductilidad, resistencia a medianas temperaturas y precio, se seleccionó el acero AISI-SAE 1045 como el apropiado para la fabricación del nuevo horno rotatorio de calcinación del mineral de yeso.
- Dadas las características del horno de calcinación, especialmente la temperatura máxima de funcionamiento ($\approx 410^{\circ}\text{C}$), se seleccionó una tela refractaria de fibra de vidrio como aislamiento térmico en la pared exterior del horno.
- A partir de relaciones semi-empíricas encontradas en la bibliografía y de datos reales de diseño y funcionamiento del horno, se determinó que la potencia necesaria para rotar el horno durante el proceso de calcinación del mineral de yeso es de 3,069 HP. Por tanto se seleccionó un motor variador-reductor con potencia nominal de 3,5 HP.

- De las pruebas de puesta en marcha del horno, se estableció que alimentando el horno con una carga de 42 kg cada 3 minutos se alcanzan las condiciones de estabilidad. Siendo la temperatura máxima (cerca al quemador) de 295°C y la temperatura de salida del yeso de 165°C. Bajo tales condiciones se obtiene un producto de alta calidad: color blanco, fraguado rápido, contenido de SO₃ de 54% aproximadamente y constituido principalmente por sulfato de calcio semi-hidratado.
- A partir de relaciones semi-empíricas y datos reales de funcionamiento del horno, se determinó los consumos de aire (16,93 m³ aire/kg combustible) y combustible (1,37 galones de ACPM/hora) para la calcinación del mineral de yeso en el horno fabricado.

8. RECOMENDACIONES

- Implementar en su totalidad el proceso mostrado en la figura 28, de tal forma que el sistema de producción sea continuo conforme lo es el suministro de aire y combustible. Con ello se facilitaría el control de las operaciones y se mantendría la calidad del producto en todos los periodos de producción.
- Dirigir el material que sale de la primera molienda al silo 1 y que este salga a una válvula de alimentación (Va), que regule la entrada del material a la cabina de alimentación. Luego que el transportador helicoidal (Th), que recibe el material proveniente de la cabina de salida lo lleve al silo 2, para que salga directo al molino para la segunda molienda y finalmente se haga el embalaje. Esto ofrece al material reposo y economía energética, porque tales dispositivos no tienen que estar encendidos en todo momento.
- Aprovechar la energía perdida por el tiraje de la chimenea, mediante la implementación de un sistema de recuperación y recirculación de calor en el proceso.

9. BIBLIOGRAFÍA

- [1] CRUZ VESGAS, Luis Eduardo, Horno Rotatorio para Tostar Minerales [Tesis de pregrado]. Bucaramanga: U.I.S, dpto. de Ingeniería Mecánica, 1981. p.10-47.
- [6] FOUST, Alan S.; WENZEL, Leonard A.; CLUMP, Curtis W.; MAUS, Louis; ANDERSEN, L. Bryce. Principles of unit operations. New York, Wiley and sons, 1962.
- [2] GRAUME-GRJIMAILO, W.E. Los Hornos Industriales de Ilima. Editorial Feliu y Susanna. Barcelona, 1915.
- [4] MARKS, Lionel, Coed. BAUMEISTER, Theodore, ED. Standard handbook for mechanical engineering. New York, Mc Graw- Hill. 7a. ed. 1967.
- [3] NOVO DE MIGUEL, Luciano. El yeso en la construcción. Escuela técnica de Peritos industriales de Tarrasa. Barcelona (España), Ediciones CEAC, S.A, 1968, Pag 9-20.
- [2] PEDRAZA ROSAS, Julio Elías. Estudio para Mejorar el Rendimiento del Horno Rotatorio de Cerro Matoso S.A. Bucaramanga: U.I.S, dpto. de Ingeniería Metalúrgica, 1988.
- [6] PERRY, John. Manual del Ingeniero Químico. New York, Mc Graw- Hill. 4a. ed. 1967.
- [5] TRINKS, W. y MAWHINNEY, M.H. Hornos industriales, Vol. I. Bilbao (España), Editorial Urmo. 1971.
- [4] VASQUEZ Q. Custodio; ROJAS G. Juan Vicente; JAIMES A. Ciro Armando; Aplicación del Diseño Experimental a la Pre reducción de Lateritas Niquelíferas en Horno Rotatorio, Bucaramanga: U.I.S, dpto. de Ingeniería Metalúrgica, 1983. Pág 26.

10. ANEXOS

ANEXO 1.

DETERMINACIÓN GRAVIMÉTRICA DE SO₃ EN MUESTRAS DE YESO

➤ OBJETIVO

Determinar gravimétricamente el porcentaje de SO₃ en el yeso, para comparar la calidad con un yeso ~100 % puro y corroborar las condiciones de trabajo de marcha.

➤ REACTIVOS

Cloruro de Bario 0,5 F:

Se pesó 122,16 gramos de BaCl₂* 2H₂O, se disolvió con agua destilada y se diluyó hasta 1000 ml.

Ácido Clorhídrico solución (1:5)

Se diluyó 100 ml de HCl concentrado en 500 ml de agua destilada.

➤ PREPARACIÓN DE LA MUESTRA

Se trituró y pulverizó la muestra que este comprendida entre 0,5g y se pasó cuantitativamente a un vaso de precipitados, se agregó 50 ml de HCl (1:5) y se llevó a ebullición, se añadió 100 ml de agua caliente y se continuó calentando a ebullición durante 5 minutos. Se filtró inmediatamente en papel franja negra y se lavó 5 veces con agua caliente siguiendo el filtrado y las aguas de lavado en el mismo vaso.

➤ **PRECIPITACIÓN**

Se calentó a ebullición el filtrado obtenido anteriormente, luego se agregó lentamente 20 ml de solución de cloruro de bario, se agito y se dejó en reposo una hora. Se comprobó que la precipitación ha sido completa, agregando una solución de cloruro de bario por las paredes y no hubo formación de precipitado alguno.

➤ **FILTRACIÓN**

Se filtró el precipitado formado en papel franja azul, se lavó 10 veces con agua hasta ausencia de cloruros y se despreció el filtrado.

➤ **CALCINACIÓN**

Se lavó y se secó un crisol de porcelana, se calcino en una mufla a 900°C durante media hora, se dejó enfriar en un desecador y se pesó.

Se pasó el precipitado junto con el papel al crisol y se colocó en un calentador eléctrico hasta carbonizar el papel. Luego se calcino en una mufla a 900°C durante una hora, se dejó enfriar en un desecador y se pesó.

➤ **CÁLCULO DEL SO₃ EN YESO**

$$\% \text{SO}_3 = \frac{P \times F \times 100}{W}$$

Dónde: P= peso del precipitado calcinado

F= Factor gravimétrico del BaSO₄

W= peso de la muestra

ANEXO 2

NORMA IRAM 1607: YESO COCIDO PARA REVOQUES. CARACTERÍSTICAS.

El presente anexo retoma de la norma IRAM 1607, en lo referente al yeso:

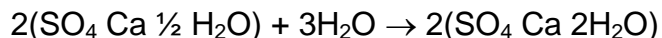
1. Las fórmulas químicas son:

- Algez: $\text{SO}_4 \text{ Ca } 2\text{H}_2\text{O}$
- Anhidrita: $\text{SO}_4 \text{ Ca}$
- Yeso Comercial: $2 (\text{SO}_4 \text{ Ca } \frac{1}{2} \text{ H}_2\text{O})$

2. Modo de endurecimiento:

El endurecimiento del yeso se produce porque al contacto con el agua, el yeso comercial [$2(\text{SO}_4 \text{ Ca } \frac{1}{2} \text{ H}_2\text{O})$] recupera las “partes” de agua que perdió al momento de producirse su coadura; al tomar estas moléculas se forma nuevamente el mineral original o Algez.

La reacción química que se produce puede escribirse de la siguiente forma:



La preparación del yeso es sencilla, solo se debe verter el yeso en un recipiente que contenga la cantidad necesaria de agua, dejar reposar un minuto y luego revolver hasta obtener una pasta homogénea. Se considera que el fraguado del yeso comienza aproximadamente a los dos minutos de producido el contacto con el agua y termina aproximadamente a los quince minutos.

3. Propiedades físicas de los Yesos (Norma IRAM 1607).

Requisitos		Unidad	Clase				Método de Ensayo
			A		B		
Finura	Material que pasa el tamiz IRAM 1.2 mm (16)	g /100 g (mínimo)	100		93		IRAM 1608
	Material que pasa el tamiz IRAM 590 μ (30)		95		85		
	Material que pasa el tamiz IRAM 149 μ (100)		70		45		
Tiempo de Fraguado	Inicial	minutos	3 MIN	–	3 MIN	–	
	Final		–	25 MAX	–	35 MAX	
Resistencia a la compresión mínima		da N /cm ²	80		50		

La Norma IRAM 1607 establece las características, propiedades o requisitos que debe cumplir el “yeso cocido”. Definiendo a este como el material obtenido por parcial deshidratación de la piedra de yeso natural (Algez), de modo que en su forma esté constituido por sulfato de calcio hemihidratado ($S_4O Ca \frac{1}{2} H_2O$).

Contenido de sulfato de calcio hemihidratado	g /100 g	80	60	
--	----------	----	----	--

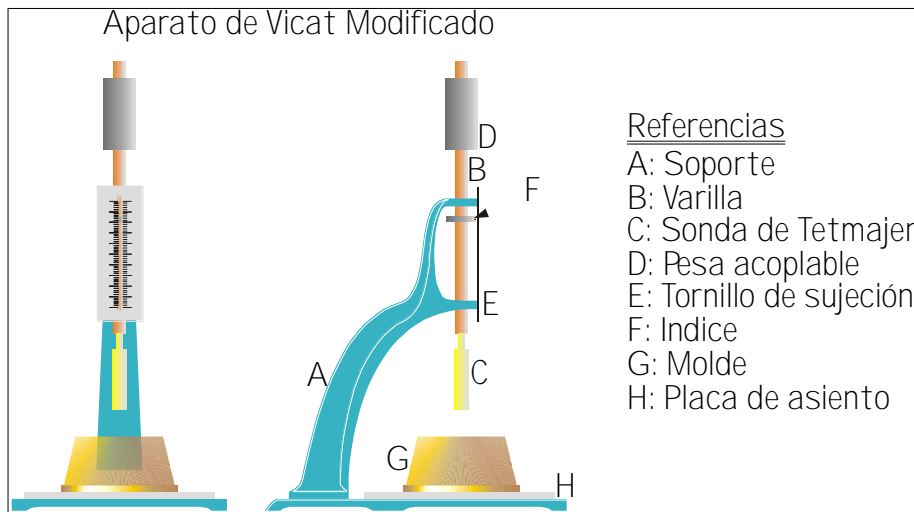
4. Descripción del Ensayo de Tiempo de Fraguado.

El aparato que se usa es el “Aparato de Vicat” original, provisto un soporte (A), una varilla móvil (B) con un peso de 300 gr, la que lleva en uno de sus extremos la sonda de Tetmajer (C) de 10 mm de diámetro y 50 mm de longitud; y en el otro extremo la aguja de Vicat (D) de 1 mm de diámetro y 50 mm también de longitud.

El molde es de forma troncocónica (G) de metal inatacable por la mezcla, de 40 mm de altura, 85 mm de diámetro interno de la base inferior y 75 mm de diámetro interno de la base superior. La placa de asiento (H) es de vidrio y tiene aproximadamente 100 mm de lado.

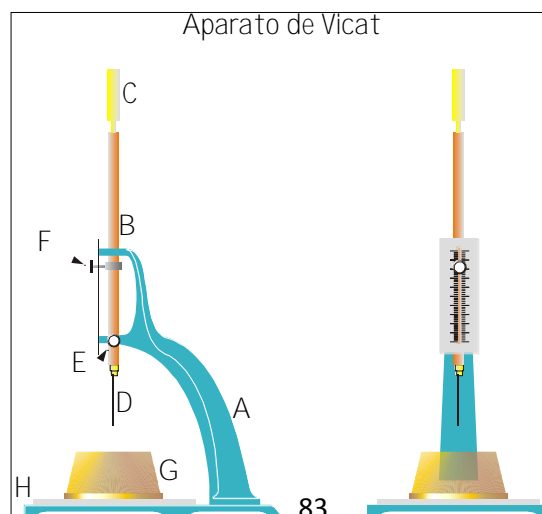
Antes de explicar el procedimiento para determinar al tiempo de fraguado es necesario definir la “pasta de consistencia normal”, ya que como se trata de un ensayo de penetración, el resultado está afectado por la consistencia de la pasta ensayada.

La pasta de consistencia normal se ensaya con el “Aparato de Vicat modificado”; similar al original, solo que la varilla es de latón, con un peso de 50 gramos y lleva en su extremo un émbolo hueco de aluminio de 19 mm de diámetro y 44 mm de longitud.



El procedimiento es el siguiente: en un recipiente adecuado se coloca un volumen de agua comprendida entre 110 y 160 ml, que esté a una temperatura entre 19 y 23 °C, en la que se haya disuelto 2 gr de borax puro para actuar como retardador. Se vierte en esta agua 200 gr de yeso, se deja reposar la mezcla por un minuto y luego se bate durante un minuto hasta obtener una fluidez uniforme. Colocada la pasta así obtenida en el molde previamente lubricado y asentado sobre la placa, se hace bajar la sonda o embolo de aluminio hasta que haga contacto con la pasta; permitiendo luego que esta penetre por su propio peso. Se considera que la pasta tiene consistencia normal cuando, en estas condiciones, se obtiene una penetración de 30 mm. Este valor debe repetirse en 2 o 3 pruebas.

Para realizar el ensayo de tiempo de fraguado se debe preparar la pasta de



consistencia normal usando 200 gr de yeso y mezclando con la cantidad de agua necesaria para preparar una pasta de consistencia normal, pero sin usar retardador. Se llena el molde, previamente lubricado y asentado sobre la placa de asiento; se lo coloca en el aparato de Vicat original y se hace descender la aguja hasta que tome contacto con la pasta, dejándola penetrar por su propio peso. Se repite la operación cada 2 minutos penetrando en distintos lugares de la probeta y cuidando de limpiar bien la aguja después de cada penetración.

Se considera iniciado el fragüe cuando la aguja se detiene a 1 mm del fondo del molde y se registra el tiempo transcurrido desde el momento en que se puso en contacto el yeso y el agua; este será el “tiempo de fraguado inicial” en minutos.

Se considera terminado el fragüe cuando la aguja no logra penetrar más de 0.5 mm; el tiempo transcurrido desde el contacto entre agua y yeso y este instante es el “tiempo de fraguado final” y se expresa en minutos.

ANEXO 3

GLOSARIO: VARIABLES USADAS EN LOS CÁLCULOS

Q_n = Calor necesario.
 Q_c = Calor absorbido por la carga.
 Q_p = calor perdido por la paredes.
 Q_g = Calor perdido por los gases.
 H_i = Poder calorífico.
 V_{AM} = Volumen de aire mínimo.
 V_{gM} = Volumen de gases mínimos.
 λ = Factor de aire designado
 V_A = Volumen de aire real
 V_g = Volumen real de los gases
 ρ = Densidad de los gases de combustión a presión del lugar.
 D_p = Diámetro mínimo de partícula.
 μ = Viscosidad del gas.
 ρ_e = Densidad a condiciones estándar.
 V_t = Velocidad admisible de la partícula del mineral.
 R = Constante de los gases.
 T = Temperatura media de los gases.
 T_e = Temperatura entrada de los gases.
 T_s = Temperatura de salida de los gases.
 T_m = Temperatura de salida media
 UA = Coeficiente global de transferencia.
 n_f = Numero de3 aletas
 ϕ = Diámetro del horno.
 \dot{m}_G = Flujo de gases que entran al horno.
 G_v = Flujo másico
 V_g = Volumen de gases en el horno.
 I_g = Entalpia de los gases.
 H_i = Poder calorífico de combustible.
 V_g = Volumen real de los gases.

$M_3 \text{ n gas} = m_3 \text{ normales de gases.}$

$E =$ Exceso de aire en los gases.

$B_v =$ Consumo volumétrico de combustible.

$V_{gc} =$ Volumen de gases por hora.

$P_h =$ peso del horno

$P_{cM} =$ Peso de carcasa metálica.

$P_r =$ Peso aislante térmico.

$P_c =$ Peso laminas galvánicas.

$P_a =$ Peso de las catalinas.

$I_c =$ Momento de inercia.

$L =$ Longitud del cilindro.

$D =$ Diámetro interior del cilindro.

$C =$ Cuerda.