

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



Propuesta de diseño de planta piloto para la producción de azufre elemental
y cal hidratada

Trabajo de graduación en modalidad de trabajo profesional
presentado por Laura Paola Pereira Marroquín para optar al
grado académico de Licenciada en Ingeniería Química
Industrial

Guatemala,
2025

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



Propuesta de diseño de planta piloto para la producción de azufre elemental
y cal hidratada

Trabajo de graduación en modalidad de trabajo profesional
presentado por Laura Paola Pereira Marroquín para optar al
grado académico de Licenciada en Ingeniería Química
Industrial

Guatemala,
2025

Vo. Bo.

(f) 

Ing. Allan Estuardo Cifuentes Iralda


Terna examinadora

(f) 

Ing. Allan Estuardo Cifuentes Iralda

(f) 

MSc. Ing. Gamaliel Giovanni Zambrano Ruano

(f) 

M.A. Ing. Carmen Alicia Ortiz Pineda

Fecha de aprobación: Guatemala, 8 de enero del 2025

PREFACIO

“¿Cuál trabajo es mejor: el intelectual o el manual? Aquel que se haga con más amor de Dios” – San Josemaría Escrivá

Agradezco a Dios permitirme estudiar Ingeniería Química Industrial, lo cual era un sueño para mí, y también dejarme escribir este trabajo de graduación. De igual manera, a Él dedico este trabajo; sin su amor incondicional cada día de mi vida, no sé qué sería de mí. También, le dedico este trabajo a mi madre, la Virgen María, quien cada día cuida de mí y me cubre con su manto. Además, no puedo dejar de mencionar a la beata Guadalupe Ortiz de Landázuri, a quien pedí su intercesión para la mayoría de mis trabajos universitarios, por lo que me acompañó a lo largo de toda la carrera.

Quisiera hacer una mención especial a mis padres, Adrián Pereira y Mónica Marroquín de Pereira, a quienes agradezco todo su apoyo y a quienes quiero mucho. De igual manera, no puedo dejar de lado a mi hermano preferido, Pedro Pereira, quien siempre está para mí y me hace reír.

También, quisiera expresar mi agradecimiento a mi casa de estudios, la Universidad del Valle de Guatemala, por la buena educación que recibí; a mi asesor el Ing. Allan Cifuentes, quien fue paciente y atento conmigo; y al director del Departamento de Ingeniería Química, Ing. Gamaliel Zambrano, por sus enseñanzas en el Laboratorio de Operaciones Unitarias.

De igual manera quisiera expresar un especial agradecimiento al Ing. Jorge Luis Ávalos por su apoyo en el desarrollo de este trabajo, al prestarme sus libros de procesos sobre el azufre y la cal, al igual que su sugerencia de tema de investigación.

Finalmente, quisiera expresar mi gratitud a mis amigos y compañeros universitarios, Adriana, Dafne, Ceci, Oscar, Rafa y Karina, por acompañarme en estos años de carrera y estar pendientes de mí.

ÍNDICE

PREFACIO	vii
ÍNDICE	viii
LISTA DE CUADROS	xii
LISTA DE FIGURAS	xv
LISTA DE ECUACIONES	xvii
RESUMEN	xviii
ABSTRACT	xix
I. INTRODUCCIÓN	1
II. OBJETIVOS	2
A. Objetivo general	2
B. Objetivos específicos	2
III. JUSTIFICACIÓN	3
IV. MARCO TEÓRICO	5
A. Yeso	5
1. Formación y ambiente	6
2. Usos y aplicaciones	8
3. Yeso hemihidrato	9
4. Yeso dihidrato	10
5. Yeso anhidrita	14

6.	Control de calidad para el yeso	15
B.	Carbón.....	16
1.	Características y propiedades del carbón vegetal	18
2.	Mercado del carbón vegetal en Guatemala	18
3.	Control de calidad para el carbón vegetal.....	19
4.	Almacenamiento del carbón vegetal	20
C.	Azufre	21
1.	Propiedades deseadas.....	21
2.	Usos y aplicaciones.....	21
4.	Almacenamiento	22
D.	Cal hidratada	24
1.	Propiedades.....	24
2.	Proceso general de producción	24
3.	Usos y aplicaciones.....	25
4.	Pruebas de control de calidad para la cal hidratada	26
5.	Almacenamiento	28
E.	Descripción de proceso Claus.....	29
F.	Proceso PIPco	31
G.	Operaciones unitarias.....	32
1.	Reducción de tamaño	32
2.	Transporte de sólidos	34
3.	Almacenamiento de sólidos	35
4.	Horno rotativo.....	35

5.	Reacción de hidrólisis	39
H.	Escala de laboratorio, escala de planta piloto y escala industrial	39
1.	Escala de laboratorio.....	39
2.	Escala de planta piloto	39
3.	Escala industrial	40
G.	Diagrama de flujo.....	41
V.	ANTECEDENTES	46
VI.	METODOLOGÍA	48
A.	Identificar operaciones unitarias y determinar base de cálculo	48
B.	Elaboración del balance de masa y energía	48
C.	Dimensionar y seleccionar equipos	49
D.	Costeo económico.....	49
VII.	RESULTADOS.....	50
VIII.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	67
IX.	CONCLUSIONES	74
X.	RECOMENDACIONES	75
XI.	REFERENCIAS.....	76
XII.	ANEXOS	80
A.	Datos originales	80
B.	Cálculos de muestra	85
C.	Datos calculados	107
D.	Fichas técnicas	128
E.	Información de equipos y maquinaria.....	154

F.	Áreas de planta piloto	156
G.	Localización de planta	158
H.	Cotizaciones	159
XIII.	GLOSARIO	162

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Licencias mineras para el yeso en Guatemala	7
Cuadro 2. Composición química en porcentaje másico de sulfato de calcio dihidrato ...	12
Cuadro 3. Propiedades físicas del sulfato de calcio dihidrato	12
Cuadro 4. Composición química en porcentaje másico del carbón vegetal	18
Cuadro 5. Propiedades físicas del carbón vegetal	18
Cuadro 6. Composición química del azufre líquido	21
Cuadro 7. Características físicas del azufre líquido	21
Cuadro 8. Composición química en porcentaje másico de la cal hidratada	24
Cuadro 9. Requisitos químicos para tipo de cal 1	27
Cuadro 10. Requisitos químicos para tipo de cal 2	27
Cuadro 11. Clasificación de los tipos de cal según ITINTEC	27
Cuadro 12. Impurezas de los tipos de cal	28
Cuadro 13. Número de Froude para distintos tipos de movimiento transversal.....	37
Cuadro 14. Simbología de equipos utilizados en los diagramas	41
Cuadro 15. Flujos de área de trituración.....	52
Cuadro 16. Dimensión de equipos seleccionados para área de trituración	53
Cuadro 17. Flujos de área de calcinación	55
Cuadro 18. Dimensión para equipos seleccionados en área de calcinación	56
Cuadro 19. Flujo de área de reactores	58
Cuadro 20. Dimensión de los equipos seleccionados para área de reactores	59
Cuadro 21. Flujos de área de proceso Claus.....	61
Cuadro 22. Dimensión de quipos seleccionados para área de proceso Claus	62
Cuadro 23. Índices económicos del proyecto	65
Cuadro 24. Composición química del sulfato de calcio dihidratado	80
Cuadro 25. Propiedades físicas del sulfato de calcio dihidtrato	81

Cuadro 26. Composición química en porcentaje másico del carbón vegetal	81
Cuadro 27. Propiedades físicas del carbón vegetal	81
Cuadro 28. Capacidad (ton/h) a (0.508 m/s; 1,601.85 kg/m ³) y ángulo de inclinación indicado.....	84
Cuadro 29. Balance de masa para trituradora 1 del diagrama de bloques.....	107
Cuadro 30. Balance de masa para trituradora 2 del diagrama de bloques.....	107
Cuadro 31. Balance de masa criba vibratoria de diagrama de bloques	108
Cuadro 32. Balance de masa molino de bolas de diagrama de bloques	108
Cuadro 33. Balance de masa de precalentador vertical de diagrama bloques	109
Cuadro 34. Balance de masa de horno rotatorio del diagrama de bloques.....	109
Cuadro 35. Balance de masa de ciclón del diagrama de bloques	110
Cuadro 36. Balance de masa de enfriador en diagrama de bloques	110
Cuadro 37. Balance de masa de almacenamiento de diagrama de bloques.....	110
Cuadro 38. Balance de masa de reactor de hidratación	111
Cuadro 39. Balance de materia de reactor térmico de diagrama de bloques.....	111
Cuadro 40. Balance de materia de centrifuga de diagrama de bloques	111
Cuadro 41. Balance de materia de separador Whizzer de diagrama de bloques	112
Cuadro 42. Balance de masa de molino de alta presión de diagrama de bloques	112
Cuadro 43. Balance de masa de almacenamiento de cal hidratada	112
Cuadro 44. Balance de masa de reactor térmico de diagrama de bloques.....	112
Cuadro 45. Balance de masa de caldera de recuperación de calor de diagrama de bloques	113
Cuadro 46. Balance de masa de condensador 1 de diagrama de bloques.....	113
Cuadro 47. Balance de masa de calentador 1 de diagrama de calentador	113
Cuadro 48. Balance de masa de reactor catalítico 1 de diagrama de bloques	113
Cuadro 49. Balance de masa de condensador 2 de diagrama de bloques.....	114
Cuadro 50. Balance de masa de calentador 2 de diagrama de bloques	114
Cuadro 51. Balance de masa de reactor catalítico 2 de diagrama de bloques	114

Cuadro 52. Balance de masa de condensador 3 de diagrama de bloques.....	114
Cuadro 53. Balance de masa de calentador 3 de diagrama de bloques	115
Cuadro 54. Balance de reactor catalítico 3 de diagrama de bloques	115
Cuadro 55. Balance de condensador 4 de diagrama de bloques.....	115
Cuadro 56. Balance de almacenamiento de azufre líquido de diagrama de bloques.....	115
Cuadro 57. Calor sensible para precalentador	116
Cuadro 58. Energía proveniente de la materia prima que entra en el horno rotatorio...	116
Cuadro 59. Calor sensible para el combustible (carbón antracita), aire primario y secundario	116
Cuadro 60. Energía de los gases agotados del horno rotatorio.....	117
Cuadro 61. Costo total de la maquinaria y equipo para la inversión en la planta piloto	117
Cuadro 62. Personal propuesto para operación de la planta piloto.....	119
Cuadro 63. Prestaciones propuestas para pago de planillas	119
Cuadro 64. Sueldos y prestaciones mensuales y anuales	119
Cuadro 65. Costo unitario de materia prima.....	120
Cuadro 66. Costo mensual por servicio básicos	120
Cuadro 67: Inversión total de la planta piloto	120
Cuadro 68. Datos respecto a la inversión y financiamiento de la planta.....	121
Cuadro 69. Cálculo de depreciación de la planta	121
Cuadro 70. Cálculo de préstamo respecto a la inversión.....	121
Cuadro 71. Distribución de pagos de préstamo	121
Cuadro 72. Variación para calcular la sensibilidad	122
Cuadro 73. Efecto de la variación en la TIR	123
Cuadro 74. Composición química del producto final cal hidratada	123
Cuadro 75. Composición del flujo másico del proceso Claus de la figura 12.....	124
Cuadro 76. Posible localización de planta de producción de azufre y cal hidratada.....	158

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Cristales de yeso	5
Figura 2. Estructura de yeso hemihidrato	9
Figura 3. Estructura de yeso dihidrato	10
Figura 4. Curvas calorimétricas de barrido diferencial y de pérdida de masa para las muestras de yeso utilizando una velocidad de calentamiento de $5^{\circ}\text{C min}^{-1}$	11
Figura 5. Tanque de almacenamiento de azufre líquido	23
Figura 6. Proceso Claus	29
Figura 7. Tipos de movimiento trasversal	38
Figura 8. Balance de masa y energía representado en un diagrama de bloques	50
Figura 9. Diagrama de flujo de área de trituración	51
Figura 10. Diagrama de flujo de área de calcinación.....	54
Figura 11: Diagrama de flujo de área de reactores	57
Figura 12. Diagrama de flujo de proceso Claus.....	60
Figura 13. Estado de resultados	63
Figura 14. Flujo de caja del proyecto	64
Figura 15. Diseño de silo para flujo de sólidos.....	82
Figura 16. Número de potencia N_p en función del número de Reynolds Re para turbinas e impulsores de alta eficiencia	82
Figura 17. Índices de trabajo para trituración seca o molienda húmeda.....	83
Figura 18. Tolva trapezoidal de almacenamiento	88
Figura 19. Diseño de silo para flujo de sólidos.....	89
Figura 20. Hoja de especificación de alimentadores de banda	128
Figura 21. Hoja de especificaciones de trituradora de mandíbula Z-001	129
Figura 22. Hoja de especificaciones de trituradora de mandíbula Z-002	130
Figura 23. Hoja de especificaciones de criba vibratoria	131

Figura 24. Hoja de especificaciones de molino de bolas	132
Figura 25. Hoja de especificaciones de precalentador.....	133
Figura 26. Hoja de especificaciones de horno rotatorio	134
Figura 27. Hoja de especificaciones de enfriador rotatorio	135
Figura 28. Hoja de especificaciones de recolector de polvo.....	136
Figura 29. Hoja de especificaciones de reactor de hidratación.....	137
Figura 30. Hoja de especificaciones de reactor térmico	138
Figura 31. Hoja de especificaciones de centrífuga	139
Figura 32. Hoja de especificaciones de molino de alta presión.....	140
Figura 33. Hoja de especificaciones de reactor térmico	141
Figura 34. Hoja de especificaciones de caldera de recuperación de calor.....	142
Figura 35. Hoja de especificaciones condensador	143
Figura 36. Hoja de especificaciones de calentador.....	144
Figura 37. Hoja de especificaciones de reactores catalíticos.....	145
Figura 38. Hoja de especificación de retroexcavadora	146
Figura 39. Hoja de especificaciones de camión de volteo	147
Figura 40. Hoja de especificaciones de básculas para camiones.....	148
Figura 41. Hoja de especificaciones de bandas transportadoras.....	149
Figura 42. Hoja de especificaciones de elevadores de canchales	150
Figura 43. Hoja de especificación de tolva trapezoidal	151
Figura 44. Hoja de especificaciones de separador de polvo	152
Figura 45. Hoja de especificación de máquina de llenado de bolsas.....	153
Figura 46. Propuesta de áreas de almacenamiento	156
Figura 47. Propuesta de áreas de planta.....	157
Figura 48. Cotización Joyal Crusher PE250*400	159

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1. Reacción de deshidratación del yeso dihidrato para formar yeso hemihidrato	15
Ecuación 2. Reacción de deshidratación del yeso hemihidrato a yeso anhidrita	15
Ecuación 3. Porcentaje de pureza del yeso	16
Ecuación 4. Reacción de proceso Claus.....	31
Ecuación 5. Reacción de reducción de sulfato de calcio a sulfuro de calcio	38
Ecuación 6. Reacción de hidratación	39
Ecuación 7. Volumen de prisma trapezoidal.....	85
Ecuación 8. Volumen de cono truncado	86
Ecuación 9. Potencia de reducción de tamaño	90
Ecuación 10. Calor sensible	96
Ecuación 11. Diseño del horno rotatorio	97
Ecuación 12. Calor de conducción.....	101
Ecuación 13. Calor de radiación	101
Ecuación 14. Número de Reynolds.....	101
Ecuación 15. Número de Prandtl	102
Ecuación 16. Número de Nusselt.....	102
Ecuación 17. Calor de convección.....	102

RESUMEN

El presente trabajo de investigación es una propuesta de diseño de una planta piloto para la producción de cal hidratada y azufre elemental. Se realizó con la finalidad de cumplir las necesidades de una empresa, especializada en el procesamiento hidrometalúrgico de minerales, la cual está en busca de expandir su mercado con productos que tengan un mercado creciente en Guatemala. Para esto, se llevó a cabo la identificación de las diferentes etapas y operaciones unitarias del proceso; se elaboraron los balances de masa y energía, a partir de una base de cálculo de 100 toneladas de yeso dihidratado; se dimensionó y seleccionó los equipos adecuados y se realizó el análisis económico del proceso. Se determinó que las principales etapas son, la reducción de yeso a sulfuro de calcio a través de una reducción carbotérmica, la hidratación del sulfuro de calcio para generar cal hidratada y sulfuro de hidrógeno y la conversión de sulfuro de hidrógeno a través del proceso de Claus. Por lo tanto, las operaciones unitarias identificadas se colocaron en el diagrama de bloques. Se obtuvo que a partir de 100 toneladas de yeso dihidratado en 1 día, se generan 2,291.434 kg/h de cal hidratada y 2,975.268 kg/h de azufre elemental. Se elaboraron fichas técnicas con las especificaciones de los equipos de la planta, en las cuales se encuentran las dimensiones necesarias. Se determinó que el proceso es rentable, gracias a que la tasa interna de retorno (TIR) de 39.83%, la cual es mayor a la tasa mínima atractiva de retorno (TMAR) de 17%, por lo que sí es conveniente invertir en una planta piloto.

Palabras clave: análisis económico, azufre elemental, balances de masa y energía, cal hidratada, operaciones unitarias, planta piloto, proceso Claus, reducción carbotérmica, yeso dihidratado.

ABSTRACT

This research work is a proposal for the design of a pilot plant for the production of hydrated lime and elemental sulfur. It was carried out with the purpose of meeting the needs of a company specialized in the hydrometallurgical processing of minerals, which seeks to expand its market with products that have a growing demand in Guatemala. For this purpose, the different stages and unit operations of the process were identified; mass and energy balances were developed based on a calculation basis of 100 tons of dihydrate gypsum; the appropriate equipment was dimensioned and selected, and the economic analysis of the process was conducted.

It was determined that the main stages are, the reduction of gypsum to calcium sulfide through carbothermic reduction, the hydration of calcium sulfide to generate hydrated lime and hydrogen sulfide, and the conversion of hydrogen sulfide through the Claus process. Therefore, the identified unit operations were placed in the block diagram.

It was obtained that from 100 tons of dihydrate gypsum in one day, 2,291.434 kg/h of hydrated lime and 2,975.268 kg/h of elemental sulfur are produced. Technical datasheets were prepared with the specifications of the plant equipment, which include the necessary dimensions. The process was determined to be profitable, as the internal rate of return (IRR) of 39.83% is higher than the minimum acceptable rate of return (MARR) of 17%. Thus, it is convenient to invest in a pilot plant.

Keywords: economic analysis, elemental sulfur, mass and energy balances, hydrated lime, unit operations, pilot plant, Claus process, carbothermic reduction, dihydrate gypsum.

I. INTRODUCCIÓN

El azufre es de gran importancia en la industria, siendo una de las materias primas más importantes. Se utiliza principalmente como derivado (ácido sulfúrico) en muchos procesos químicos e industriales, particularmente importante en la fabricación de fertilizantes, procesamiento del caucho, cosméticos y aplicaciones farmacéuticas. Tiene una relativa facilidad de transporte, lo cual lo convierte en un producto de alto interés internacional. Se puede recuperar de varias formas siendo de las más populares como subproducto de la refinación de petróleo. De igual manera, se puede obtener azufre por medio de la recuperación de arenas bituminosas, el procesamiento de gas natural, en plantas metalúrgicas y plantas de coquización. En los últimos cinco años, la producción de azufre se ha visto afectada por la reducción del procesamiento de gas natural, un cambio en las mezclas de materias primas de crudo agrío a ligeramente dulce, el agotamiento de ciertos yacimientos de gas natural y cambios en la demanda de algunos tipos de combustible (S&P Global, 2024). Por lo tanto, nuevas formas de obtener azufre elemental cobran más importancia. Entre otras maneras en las que se puede recuperar el azufre es a partir de los sulfatos como el sulfato de calcio, comúnmente conocido como yeso.

El proceso de producción de azufre elemental a partir de sulfato de calcio puede generar distintos subproductos como el dióxido de carbono y la cal hidratada. Para este estudio es de interés la obtención de la cal hidratada como subproducto. En general, el proceso de producción se puede dividir en tres etapas: la reducción del yeso (sulfato de calcio) en sulfuro de calcio; la hidratación del sulfuro de calcio o reacción de este con agua, para producir hidróxido de calcio (cal hidratada) y sulfuro de hidrógeno; y la conversión de sulfuro de hidrógeno en azufre elemental.

El objetivo de este trabajo es proponer el diseño de una planta piloto para la producción de azufre elemental y cal hidratada a partir de yeso, y hacer un análisis económico del proceso. Los objetivos específicos son identificar las diferentes etapas y operaciones unitarias de la producción de cal hidratada y azufre elemental; elaborar los balances de masa y energía del proceso; dimensionar y seleccionar equipos; y realizar un análisis económico del proceso.

II. OBJETIVOS

A. Objetivo general

Proponer el diseño de una planta piloto para la producción de azufre elemental y cal hidratada a partir de yeso, y hacer un análisis económico del proceso.

B. Objetivos específicos

1. Identificar las diferentes etapas y operaciones unitarias de la producción de cal hidratada y azufre elemental, para determinar las condiciones del proceso.
2. Elaborar los balances de masa y energía del proceso para dimensionar los equipos a utilizar, a partir de una base de cálculo de 100 toneladas diarias de yeso.
3. Dimensionar y seleccionar los equipos necesarios para la producción de azufre elemental y cal hidratada, utilizando como materia prima yeso.
4. Realizar un análisis económico del proceso para evaluar su rentabilidad a largo plazo.

III. JUSTIFICACIÓN

El azufre tiene una gran importancia industrial ya que es la materia prima de muchas industrias como lo son las de fertilizantes, ácidos, metales, petróleo, insecticidas y explosivos. Sus mayores usos provienen como intermediario de ácido sulfúrico y menor cantidad de dióxido de azufre. Generalmente se prefiere el uso de azufre elemental para estos productos sobre otras fuentes de azufre debido a las facilidades de transporte tanto económicas como de seguridad (de Beer y otros, 2014). En el marco nacional, el azufre es un producto mayormente importado principalmente de países como Venezuela, Corea del Sur y Estados Unidos, siendo para el 2022 una importación de alrededor de \$472K (OEC, 2022). Por lo que sería un producto de interés en la industria guatemalteca, al limitar las importaciones de este producto favoreciendo el mercado del país.

El azufre elemental se puede obtener de diversas formas como la minería y a partir de combustibles fósiles. Pero una de las vías de producción menos conocidas es a partir de sulfatos, como el sulfato de calcio comúnmente conocido como yeso. En el proceso productivo se puede obtener también cal hidratada, la cual tiene diversos usos en la estabilización de suelos, agricultura, conservación de frutas y procesamiento de aguas. En Guatemala se encuentran distintos puntos de explotación de yeso en los departamentos de Quiché y Alta Verapaz. De igual manera las exportaciones de yeso son alrededor de \$4.51 Millones en el 2022, lo que indica su abundancia en el territorio (OEC, 2022). Por lo tanto, la producción de azufre un producto generalmente importado a partir de materia prima encontrada en el territorio guatemalteco es una opción que favorece la industria guatemalteca.

Actualmente existe la tendencia de promover la industria guatemalteca como una base para el desarrollo sostenible del país, resaltando que el sector es clave para el progreso de un país al proveer las bases de una economía fuerte. Por lo tanto, se incentivan las pequeñas y medianas empresas, las cuales actualmente general el 80% de los empleos y contribuyen

al 40% del Producto Interno Bruto de país (Curruchich, 2021). El presente trabajo de investigación busca cumplir las necesidades de una empresa nacional, especializada en el procesamiento hidrometalúrgico de minerales. La cual está en busca de expandir su mercado con productos que tengan un mercado creciente en Guatemala. Por lo que se optó por una propuesta de planta piloto para azufre elemental y cal hidratada a partir de yeso; al ser una empresa con conocimiento en la exploración y explotación de minerales en Guatemala.

IV. MARCO TEÓRICO

A. Yeso

Este puede ser sin olor, amarillo, gris, rojo o café. Los cristales son prismas planos y pueden crecer hasta 1 metro. Puede aparecer como cristales transparentes (selenita); cristales fibrosos y alargados (satinados espató); masas granulares y compactas (alabastro); y en forma de roseta agregados llamados rosas del desierto (Nengovhela R. N., 2009). Comúnmente en la naturaleza el yeso está compuesto por sulfato de calcio dihidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$). El contenido de agua es esencial para las propiedades únicas y su versatilidad. Cuando el yeso se calienta, puede pasar por un proceso de calcinación, en el cual se puede perder todo o parcialmente el contenido de agua, dependiendo de la temperatura y la duración del calentamiento. Este proceso de calcinación puede dar a la formación de yeso hemihidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 0.5 \text{H}_2\text{O}$) y el yeso anhidrita (CaSO_4) (Geology Science, 2023).

Figura 1. Cristales de yeso



Nota. Adaptada de Negovhela (2009).

1. Formación y ambiente

Existen diferentes maneras en las que se puede dar la formación de yeso. El primero y el más común son los yacimientos de origen evaporítico, asociados a antiguos mares o lagos salados, cuando al evaporarse el agua precipitaba el sulfato de calcio que contenía. Es decir cuando el agua de mar se satura de soluciones ricas en calcio y otras sales minerales de sodio se puede dar una reacción con ácido sulfúrico y al elevarse la temperatura se da el proceso de evaporación y precipitación química, lo que da lugar a acumulaciones de depósitos de yeso y anhidrita (Secretaría de Minería Mexicana, 2017). Entre otras maneras en las que se encuentran la formación de yeso es por medio de la hidratación de anhidrita, por fumarolas sulfurosas, ácido sulfúrico procedente de las piritas sobre la calcita de margas y arcillas calcáreas (Universidad de Málaga , 2022).

La explotación de yacimientos de yeso tiene diversos criterios que se deben cumplir y estas varían dependiendo del fin para el que se desea el yeso. Si se desea obtener yeso común, la explotación debe tener un mínimo de sulfato cálcico entre el 80 y 85%, en cambio para escayolas especiales se requiere un porcentaje de sulfato del 92-95%. El tonelaje que se extraiga del yacimiento debe ser suficiente para justificar las inversiones, teniendo la capacidad de producción y reservas de mineral equilibradas. De igual manera la capa debe ser lo más continua posible, ya que las capas discontinuas con zonas estériles son difíciles y peligrosas de explotar. Finalmente, la presencia de agua es un peligro y un perjuicio para toda la cantera, por lo que se deben realizar trabajos de reconocimiento para asegurar los niveles de agua (Parcerisa, 1997).

1.1 Yacimientos en Guatemala

La producción minera de yeso en Guatemala para el año 2022 fue de una cantidad vendida 206,143.17 toneladas métricas y una venta total de Q 5,228,656.58. Este principalmente se encuentra localizado en los departamentos de Alta Verapaz, Chiquimula y Quiché (Muñoz & Rosal Higueros, 2022). A continuación, se muestra un cuadro con diferentes licencias mineras en Guatemala del mineral yeso.

Cuadro 1. Licencias mineras para el yeso en Guatemala

Nombre	Área (km²)	Tipo	Municipio	Departamento
Yexub	0.005	Explotación	Cunen	Quiché
Lizangel I	21	Exploración	San Cristóbal Verapaz y Chicamán	Alta Verapaz y Quiché
Rivera del Río	1.0457	Explotación	Chicamán	Quiché
La Cruz Chixiquin	0.5594	Explotación	Chicamán	Quiché
El Chepenal	2.1825	Explotación	San Cristóbal Verapaz	Alta Verapaz
Vuelta del Río	0.551	Explotación	Chicamán	Quiché
Las Cureñas	0.875	Explotación	San Cristóbal Verapaz y Chicamán	Alta Verapaz y Quiché
Canteras el Campamento	4.5	Explotación	San Cristóbal Verapaz y Chicamán	Alta Verapaz y Quiché
Los encuentros	2.9832	Explotación	Chicamán	Quiché
Add Mineral	0.0589	Explotación	Cunen	Quiché
El Embudo de Santa Elena	4.6850	Explotación	San Cristóbal Verapaz	Alta Verapaz
La Palma	0.8000	Explotación	San Cristóbal Verapaz	Alta Verapaz
Asturica	0.9350	Explotación	Aguacatan	Huehuetenango

Nota. Adaptada de Ministerio de Energía y Minas (2021).

2. Usos y aplicaciones

El yeso se utiliza en la industria agrícola y construcción; como fertilizante se utiliza para aportar azufre o calcio, o como acondicionador de los suelos para reducir la salinidad. También puede utilizarse para mejorar la tasa de infiltración del agua de riego de baja conductividad y para la clarificación del agua.

El yeso puede ser utilizado como fertilizante de azufre, esto se utiliza generalmente cuando se tiene disponible localmente el yeso a precios competitivos. Existen dos casos principales en los que se utiliza el yeso como fertilizante de azufre; en pasturas basadas en leguminosas y en aceite como aplicación previa a la siembra. También es utilizado como fertilizante de calcio, este puede estar en forma de cal como corrector de pH, este es utilizado como una rápida respuesta, en cambio la cal puede llegar a utilizarse como solución a largo plazo. Como acondicionador de suelo el yeso ayuda a con algunos problemas estructurales del suelo como es la pobre aireación, reducción de infiltración de agua y erosión.

De igual manera el yeso puede ser utilizado como agente floculante para el agua turbia de presas, pozos, etc. Hace que las partículas coloidales suspendidas muy finas se aglomeren entre sí, formando partículas demasiado grandes para permanecer en suspensión, por lo que caen al fondo. Disolver el yeso en el agua de riego por inundación antes de su aplicación aumentará su contenido de electrolitos o conductividad, por lo que ayuda a mejorar los problemas de irrigación del agua (Incitec Pivot Fertilisers, 2021).

Cuando se añade el yeso a materiales de construcción mejora las propiedades estructurales y su funcionalidad. Las propiedades del yeso que se pueden transferir a los materiales de construcción son las siguientes: aislante térmico, aislante acústico, confort y acabados estéticos, regulador de la humedad en el ambiente y resistencia al fuego. Para la construcción el yeso es principalmente utilizado en forma de polvo. Cuando el yeso sólido natural se calienta, pierde algunas o todas sus moléculas de agua, convirtiéndose en polvo. En la industria de la construcción, esto se conoce como yeso. Dependiendo de la cantidad de calor que se aplique al yeso, se pueden crear diferentes tipos de yeso con diferentes usos en la construcción. Sus usos en construcción son las placas de yeso; las cuales están hechas de un núcleo de yeso, que contiene aditivos para mejorar la calidad estructural; yeso decorativo, el cual es de utilidad para generar moldes debido a su secado rápido; hormigón

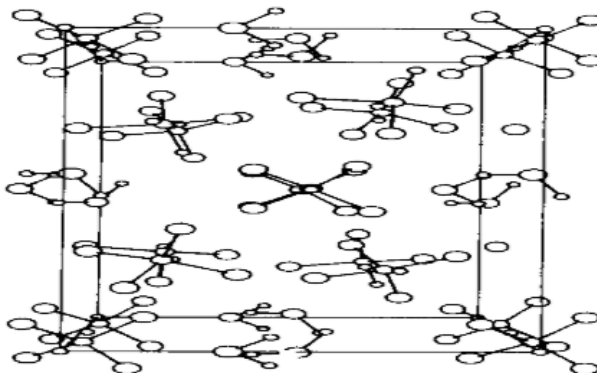
el cual se agrega yeso al cemento para aumentar el tiempo que tarda el cemento en secarse y endurecerse; bloques de yeso el cual se presenta en forma de placas de yeso las cuales son utilizadas para tabiques en edificios; solera autonivelante a base de yeso los cuales se usan para nivelar el suelo en los edificios (Simpson, 2023).

Entre otros usos diferentes del yeso están la confección de moldes de dentaduras en odontología, y usos quirúrgicos para inmovilizar huesos y facilitar la regeneración ósea de una fractura, en moldes de preparación y reproducción de esculturas.

3. Yeso hemihidrato

El hemihidrato (sulfato de calcio parcialmente seco) es una sustancia fina, inodora y polvo insípido que se presenta en la naturaleza como mineral de bassanita. cuando se mezcla con agua se endurece hasta formar una masa dura. Se utiliza para revoques de paredes, paneles de yeso y bloques para la industria de la construcción. El hemihidrato existe en dos formas, denominadas α y β . Estas dos formas son los estados límite de esta fase y se distinguen entre sí por su propiedades, relaciones energéticas y métodos de preparación. El α - El hemihidrato se produce bajo presión en una atmósfera húmeda y consiste en de grandes partículas primarias. El β -hemihidrato forma secundarias escamosas e irregulares. Partículas que consisten en pequeños cristales individuales. La solubilidad del α - el hemihidrato en agua a 20 °C es de 0.88 g/100 g de solución y el del β - el hemihidrato es 0,67 g/100 ml de solución (Nengovhela R. N., 2009).

Figura 2. Estructura de yeso hemihidrato

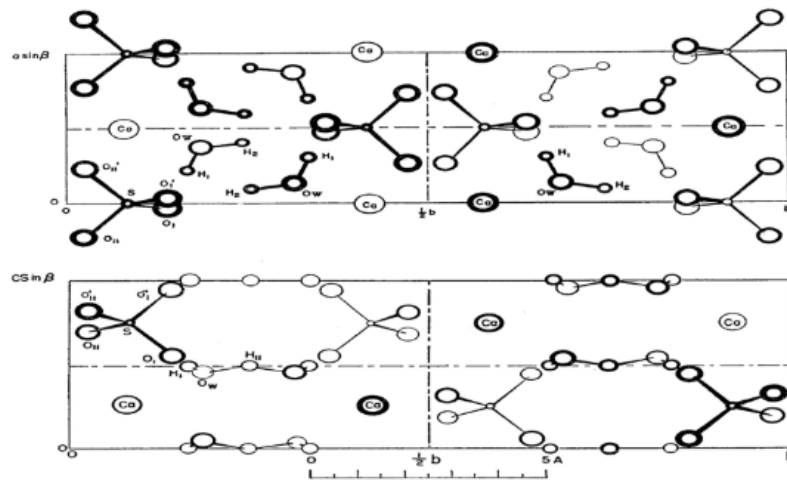


Nota. Adaptada de Negovhela (2009).

4. Yeso dihidrato

El dihidrato se presenta en la naturaleza como una masa compacta y de grano fino de pequeños cristales. Se utiliza en la fabricación de cemento Portland, en el tratamiento de suelos para neutralizar carbonatos alcalinos y para prevenir la pérdida de compuestos volátiles y para la fabricación de Yeso de París como pigmento blanco. El dihidrato es soluble en agua y prácticamente insoluble en la mayoría de disolventes orgánicos. Su solubilidad en agua es de 0.21 g/100 g de solución (Nengovhela R. N., 2009).

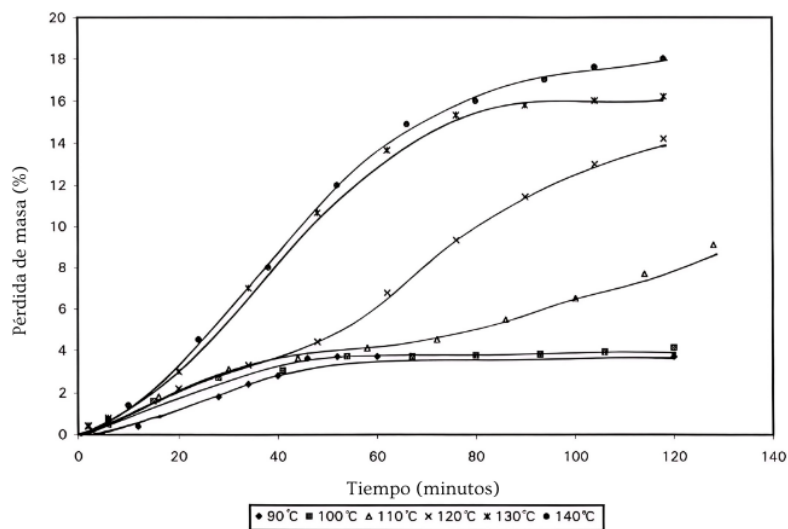
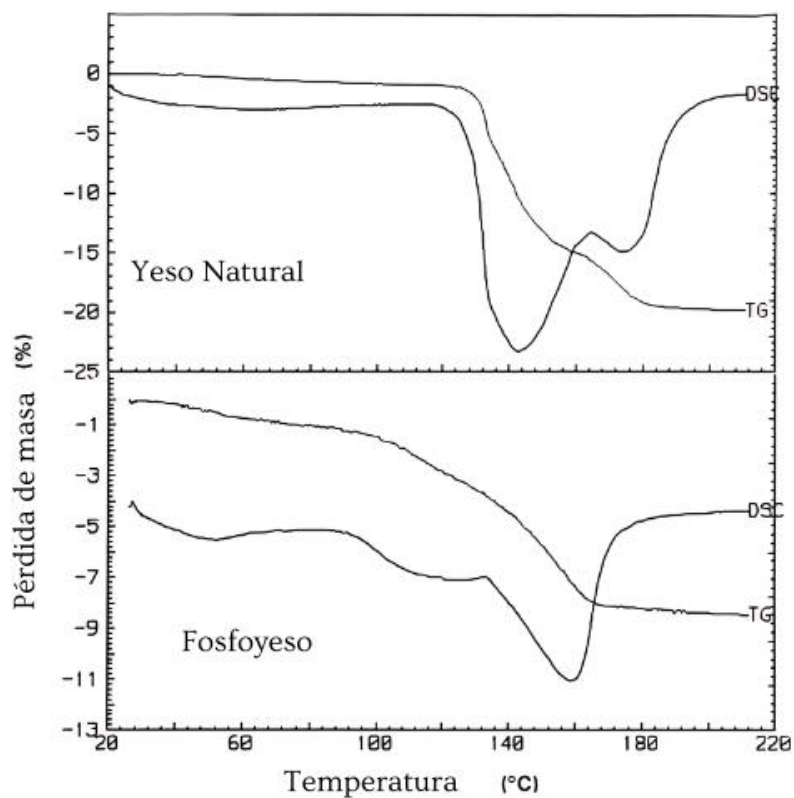
Figura 3. Estructura de yeso dihidrato



Nota. Adaptada de Negovhela (2009).

Las rocas de yeso dihidratado a temperaturas de molienda entre 1158°C y 1308°C, la forma dihidrato puede deshidratarse a la forma hemihidrato y en menor medida al sulfato de calcio anhidrita, por lo que a continuación se muestra un gráfico dónde se enseñan las pérdidas de hidratación del yeso a distintas temperaturas.

Figura 4. Curvas calorimétricas de barrido diferencial y de pérdida de masa para las muestras de yeso utilizando una velocidad de calentamiento de $5^{\circ}\text{C min}^{-1}$



Nota. Adaptada de Strydom y Potgieter (1999).

4.1 Características y propiedades del yeso dihidrato

El yeso dihidratado tiene varias propiedades que lo caracterizan, las cuales son de importancia para determinar sus distintas aplicaciones. Este es soluble en agua dulce,

aunque en presencia de sales incrementa su solubilidad. Entre otras características importantes que se deben tomar en cuenta es la finura del molido, ya que, entre mayor grado de finura, más completa la reacción. A continuación, se muestra un cuadro de su composición química y un cuadro con otras propiedades de utilidad.

Cuadro 2. Composición química en porcentaje másico de sulfato de calcio dihidrato

Compuesto	Composición (% m/m)
SiO ₂	3.7
Al ₂ O ₃	0.3
Fe ₂ O ₃	0.2
Mn ₂ O ₃	<0.1
TiO ₂	0.1
CaO	31.0
MgO	1.0
P ₂ O ₅	<0.1
SO ₃	43.8
Cl	0.1
K ₂ O	0.1
Na ₂ O	0.1
SrO	0.2
H ₂ O	19.4
<i>Total CaSO₄</i>	<i>74.8</i>

Nota. Adaptada de Strydom y Potgieter (1999).

Cuadro 3. Propiedades físicas del sulfato de calcio dihidrato

Características de sulfato de calcio dihidrato	
Dureza	2 Mohs
Gravedad específica	2.32
Diámetro	15-20 cm
Solubilidad	0.26 kg/ 100 L agua
Densidad de sólido	2.30 g/cm ³
Densidad de bulto	1.4 g/cm ³
Ángulo de reposo	45°
Ángulo de deslizamiento	47.5°
Calor específico (Cp)	1.09 kJ/kg°C

Nota. Adaptada de Secretaría de Minería Mexicana (2017).

4.2 Almacenamiento del yeso dihidrato

El almacenamiento de las rocas de yeso dihidrato es importante para mantener la calidad y su facilidad de manejo. Los materiales gruesos, tales como lo pueden ser la grava y carbón, se almacenan a la intemperie en grandes apilamientos, sin protección al clima. Siendo que cuando se trata de cientos y millares de toneladas es el método más económico. Los sólidos se retiran del apilamiento por medio de una cinta transportadora o una pala excavadora se entregan un transportador o al proceso (McCabe y otros, 2007).

Se puede tener el almacenamiento abierto a la intemperie o cubierto, siendo últimamente recomendada el cubierto para evitar riesgos de seguridad o falta de calidad. Por lo que se recomienda mantener el yeso almacenado en un lugar extremadamente seco y fresco, ya que el yeso es altamente oxidante por naturaleza y su tasa de oxidación aumenta con el aumento de la humedad y la temperatura. Las pilas de almacenamiento de yeso deben controlarse a intervalos regulares para evitar el problema de apelmazamiento (la solidificación total o parcial de sólidos a granel). Para evitar que la calidad del yeso se degrade por la humedad y la lluvia, las reservas de yeso deben mantenerse bajo cobertizos y lejos del agua (Hindustan Alcox Limited, 2017).

En la industria de manipulación de materiales a granel, los sistemas de almacenamiento cerrados se pueden dividir en tres categorías principales: Sistemas de almacenamiento en silos, Almacenamiento longitudinal (tipo marco) (almacenamiento cubierto) y Almacenamiento de tipo domo/circular (almacenamiento circular cubierto) (Hindustan Alcox Limited, 2017).

De estos tres tipos de almacenamiento, el almacenamiento de tipo domo es preferible debido a su arquitectura rápida, práctica y versátil. La estructura de domo es un techo o bóveda que tiene una forma circular, poligonal o generalmente semiesférica con su curvatura utilizada como techado. Ahora se entiende la importancia de los domos para resistir fuertes lluvias y otras condiciones climáticas adversas, ya que antes los domos solo se usaban para construir edificios arquitectónicos. Es por eso por lo que ahora los domos se destacan en casi todas las esferas de la industria de la construcción (Hindustan Alcox Limited, 2017).

Como alternativa a los depósitos abiertos, los domos de yeso son económicos, rápidos y ecológicos. En términos de versatilidad, conveniencia y operación rápida, estos domos

superan a otras estructuras de estructura espacial. A continuación, se detallan los puntos para explicar por qué los domos de yeso son la mejor solución de almacenamiento a granel (Hindustan Alcox Limited, 2017).

Flexibilidad: la versatilidad del almacenamiento de yeso se puede ver en su capacidad para proporcionar el máximo espacio para almacenar yeso y lo versátil que es con el almacenamiento adicional de varias otras materias primas. Estos domos cubren un gran espacio para facilitar el almacenamiento de varias materias primas en el mismo espacio (Hindustan Alcox Limited, 2017).

Rapidez: la manipulación del yeso se basa en varias operaciones como carga, descarga, transporte, almacenamiento y alimentación. El sistema de procesamiento funcionará de manera eficiente solo cuando exista una configuración adecuada para el almacenamiento y la manipulación de materiales. La cúpula de yeso ofrece la oportunidad de lograr una configuración eficiente para el almacenamiento y el proceso de manipulación de materiales, a fin de aprovechar al máximo el espacio y también resulta útil para que la mano de obra tenga comodidad en casi todos los trabajos operativos (Hindustan Alcox Limited, 2017).

5. Yeso anhidrita

La anhidrita existe en tres fases: anhidrita de sulfato de calcio soluble (γ -CaSO₄) con una estructura cristalina; anhidrita de sulfato de calcio insoluble (β -CaSO₄), fase de anhidrita de sulfato de calcio de alta temperatura (α -CaSO₄). La anhidrita insoluble tiene la misma estructura cristalina que el mineral y se obtiene tras la deshidratación completa del sulfato de calcio dihidrato por encima de 200 °C. Se utiliza en formulaciones de cemento y como filtro de papel. La anhidrita soluble se obtiene en forma granular o en polvo mediante la deshidratación completa del sulfato de calcio dihidrato por encima de los 120 °C. Debido a su fuerte tendencia a absorber humedad, la anhidrita soluble es útil como agente secante para sólidos, líquidos orgánicos y gases. La anhidrita de sulfato de calcio de alta temperatura es insoluble en agua y existe a temperaturas superiores a 1180 °C. La anhidrita se puede formar por diferentes reacciones de deshidratación que se muestran en el siguiente párrafo. El dihidrato y la anhidrita insoluble son materiales estables que se encuentran en la naturaleza, mientras que el hemihidrato y la anhidrita soluble son altamente inestables y reaccionan fácilmente con el agua. Cuando el dihidrato se calienta, se deshidrata en dos pasos hasta convertirse en hemihidrato y anhidrita soluble

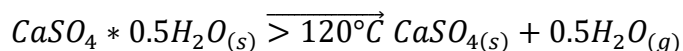
(Nengovhela R. N., 2009).

Ecuación 1. Reacción de deshidratación del yeso dihidrato para formar yeso hemihidrato



(Nengovhela R. N., 2009)

Ecuación 2. Reacción de deshidratación del yeso hemihidrato a yeso anhidrita



(Nengovhela R. N., 2009)

6. Control de calidad para el yeso

El control de calidad del yeso es necesario para la evaluación de la materia prima y garantizar que el material cumpla adecuadamente con los requisitos técnicos para llevar a cabo el proceso de obtención de cal hidratada y azufre elemental. Es especialmente importante tomar en cuenta que las rocas a utilizar son de yeso dihidrato. A continuación, se describen los principales aspectos de control de calidad:

- Pureza y composición del sulfato de calcio: los criterios de pureza, que son críticos para el control de calidad, se centran en el calcio (Ca), el magnesio (Mg), el silicio (Si), el aluminio (Al), el hierro (Fe) y el potasio (K). La espectroscopia de fluorescencia de rayos X (XRF) es la forma más eficiente y eficaz de realizar análisis de pureza y clasificar la piedra de yeso. (Bruker, 2024).
- Granulometría: las pruebas de granulometría para yeso son esenciales para determinar la distribución del tamaño de las partículas en el material. Este análisis se realiza comúnmente mediante el uso de tamices de diferentes aberturas para separar las partículas según su tamaño (Cañas, 2007).
- Absorción del agua: el yeso dihidrato contiene grandes cantidades de agua que pueden afectar la pureza. Por lo que se pueden realizar pruebas para determinar la cantidad de agua. Para ello se deben tomar muestras selladas en plástico, colocando la fecha, se pesan 10 gramos de cada muestra y se le añaden 10 mL de agua, asegurándose que la

muestra quede sumergida y se pesa, luego se coloca en un horno a 450°C por 4 horas, a esta temperatura se debe remover toda la humedad y el agua de la muestra, finalmente se pesa de nuevo. Por lo que se puede calcular la pureza del yeso, con la proporción de agua ganada vs. máximo de agua ganada (Jacobs y otros, 2023).

Ecuación 3. Porcentaje de pureza del yeso

$$\% \text{ Pureza} = \frac{\text{Masa real de agua ganada}}{\text{Máximo de agua ganada}} * 100\%$$

Dónde:

$$\text{Máximo de agua ganada} = \frac{X \text{ mol de } H_2O * 18 \frac{g}{\text{mol } H_2O}}{172 \frac{g}{\text{mol } CaSO_4 * H_2O}}$$

(Jacobs y otros, 2023)

B. Carbón

El carbono es un elemento químico no metálico que pertenece al grupo 14 de la tabla periódica. A pesar de estar distribuido ampliamente a lo largo de la Tierra solo representa alrededor del 0.025% de la superficie terrestre, aunque forme más compuestos que todos los demás elementos combinados. Pero para este trabajo de investigación será relevante el carbón como medio de obtención de carbono (C) (Britannica, 2024).

El carbón es una roca sedimentaria combustible de color negro o negro con café con una gran cantidad de carbono e hidrocarburos. El carbón se clasifica como una fuente de energía no renovable porque tarda millones de años en formarse. El carbón contiene la energía almacenada por las plantas que vivieron hace cientos de millones de años en los bosques pantanosos. El carbón es principalmente carbono con cantidades variables de otros elementos, principalmente hidrógeno, azufre, oxígeno y nitrógeno. Para su formación se requiere que las capas de suciedad y rocas cubiertas por plantas alrededor de un millón de años, que junto con la presión y el calor resultantes transformaron las plantas en la sustancia que llamamos carbón (U.S Energy Information and Administration, 2024).

El carbón se clasifica en cuatro tipos principales o rangos: antracita, bituminoso, subbituminoso y lignito. La clasificación depende de los tipos y cantidades de carbono que contiene el carbón y de la cantidad de energía térmica que puede producir. El rango de un depósito de carbón se determina por la cantidad de presión y calor que actuó sobre las plantas a lo largo del tiempo (U.S Energy Information and Administration, 2024).

La antracita contiene entre un 86% y un 97% de carbono y, por lo general, tiene el valor calorífico más alto de todos los rangos de carbón. La antracita representó menos del 1% del carbón extraído en los Estados Unidos en 2022 (U.S Energy Information and Administration, 2024).

El carbón bituminoso contiene entre un 45% y un 86% de carbono. En los Estados Unidos tiene entre 100 y 300 millones de años. Este es el tipo de carbón más abundante que se encuentra en los Estados Unidos y representó aproximadamente el 46 % de la producción total de carbón de ese país en 2022. El carbón bituminoso se utiliza para generar electricidad y es un combustible y una materia prima importantes para fabricar carbón de coque para la industria del hierro y el acero (U.S Energy Information and Administration, 2024).

El carbón subbituminoso generalmente contiene entre un 35 % y un 45 % de carbono y tiene un valor calorífico inferior al del carbón bituminoso. La mayor parte del carbón subbituminoso de los Estados Unidos tiene al menos 100 millones de años. En 2022, el carbón subbituminoso representó alrededor del 46 % de la producción total de carbón de EE. UU (U.S Energy Information and Administration, 2024).

El lignito contiene entre un 25 % y un 35 % de carbono y tiene el contenido energético más bajo de todos los rangos de carbón. Los depósitos de carbón de lignito tienden a ser relativamente jóvenes y no estuvieron sujetos a calor o presión extremos. El lignito es desmenuzable y tiene un alto contenido de humedad, lo que contribuye a su bajo poder calorífico. En 2022, cinco estados produjeron lignito, que representó el 8 % de la producción total de carbón de EE. UU (U.S Energy Information and Administration, 2024).

Entre otras formas de carbón está el carbón vegetal, el cual es una forma impura de carbono grafitico, que se obtiene como residuo cuando un material con contenido alto de carbón se quema de manera incompleta o se calienta con acceso limitado de aire. El coque, y el hollín pueden considerarse formas de carbón vegetal; otras variantes suelen denominarse según el material del que provienen, como la madera, la sangre o los huesos (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, 2000).

1. Características y propiedades del carbón vegetal

El carbón vegetal tiene diversas propiedades que lo caracterizan, las cuales son de importancia para determinar sus usos en distintas aplicaciones. A continuación, se muestra un cuadro con su composición química y otro con propiedades de utilidad a lo largo del proyecto.

Cuadro 4. Composición química en porcentaje másico del carbón vegetal

Composición de la muestra	Composición (% m/m)
Humedad	7.5
Cenizas	1.4
Materia volátil	16.9
Carbón	74.2

Nota. Adaptada de Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (2000).

Cuadro 5. Propiedades físicas del carbón vegetal

Características del carbón vegetal	
Diámetro	6 cm
Dureza	1.5 Mohs
Poder calorífico	32,410 kJ/kg
Densidad de Bulto	0.225 g/cm ³
Densidad carbón pulverizado	0.708 g/cm ³
Angulo de reposo	35°
Angulo de deslizamiento	36°
Calor específico (Cp)	0.34 kJ/kg°C

Nota. Adaptada de Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (2000).

2. Mercado del carbón vegetal en Guatemala

En 2022, Guatemala exportó \$186,000 en carbón vegetal (incluyendo el carbón de corteza o frutos, aglomerado o no), ubicándose como el exportador número 91 de este

producto a nivel mundial. Ese año, el carbón vegetal fue el producto número 674 más exportado del país. Los principales destinos de estas exportaciones fueron Estados Unidos (\$185,000), Jordania (\$784) y Honduras (\$592). Entre 2021 y 2022, los mercados de exportación que más crecieron para el carbón vegetal de Guatemala fueron Estados Unidos (\$165,000), Jordania (\$784) y Honduras (\$592) (OEC, 2022).

En Guatemala existen distintas empresas que se encargan de generar carbón vegetal como lo es Agromaster quien produce, envasa y distribuye el carbón nativo a nivel nacional siendo un producto que es 100% vegetal que procede de sistemas agroforestales (Ozeta, 2021). De igual manera esta Fomentos S.A el cual cuenta con un proceso a escala industrial con hornos con paredes de ladrillos en forma de iglú (Rodas, 2012).

3. Control de calidad para el carbón vegetal

La mayoría de las especificaciones usadas para controlar la calidad del carbón vegetal se han originado en la industria del acero o química. La calidad del carbón vegetal puede especificarse y medirse en varias formas, siendo importante la función que tendrá. Eficiencia en el uso significa generalmente la transferencia máxima de calor del carbón vegetal al objeto deseado. La calidad del carbón vegetal se define según algunas de sus propiedades y, si bien todas en cierto modo están interrelacionadas, se miden y se valúan por separado; a continuación, se analizan estos diversos factores de calidad (FAO, 1983).

El carbón fresco, apenas abierto el horno, contiene muy poca humedad, generalmente menos del 1%. La absorción de humedad del aire mismo es rápida, y gana con el tiempo humedad que, aun sin mojarse con la lluvia, puede llegar a un contenido del 5 al 10%. El almacenamiento del carbón bajo techo es una buena práctica, aún si se ha adquirido por volumen, puesto que el agua contenida tiene que evaporar en la combustión y representa una pérdida directa de poder calorífico. Las especificaciones de calidad limitan generalmente el contenido de humedad a alrededor del 5-15% del peso bruto del carbón vegetal. El contenido de humedad se determina secando al horno una muestra de carbón, y se expresa en por ciento del peso inicial húmedo (FAO, 1983).

La substancia volátil en el carbón vegetal puede variar desde un tope del 40%, o más, hasta un 5%, o menos. Su medición se hace calentando una muestra, por peso de carbón seco y lejos del aire, a 900° o hasta un peso constante. La pérdida de peso es la substancia volátil, que se especifica, por lo general, como libre de contenido de humedad (FAO, 1983).

El contenido de carbono fijo es el componente más importante en metalurgia, puesto que el carbono fijo es el responsable de la reducción de los óxidos de hierro en el hierro fundido durante su producción. Pero el usuario industrial, para obtener una operación óptima de fundición, debe encontrar un balance entre el carácter quebradizo de un carbón vegetal con elevado contenido de carbono fijo y la mayor fuerza de un carbón vegetal con un contenido inferior en carbono fijo, y superior en materia volátil (FAO, 1983).

El contenido de cenizas en el carbón vegetal varía desde alrededor del 0,5% a más del 5%, dependiendo de la especie de madera, la cantidad de corteza incluida con la madera en el horno y la cantidad de contaminación con tierra y arena. Típicamente, un pedazo de buen carbón vegetal tiene un contenido de cenizas de alrededor del 3% (FAO, 1983).

4. Almacenamiento del carbón vegetal

El almacenamiento de carbón vegetal requiere condiciones específicas para preservar su calidad, evitar pérdidas y minimizar riesgos. Debe guardarse en un lugar seco, ventilado y protegido de la humedad, ya que el carbón vegetal es higroscópico y puede absorber agua, reduciendo su eficiencia como combustible. Se recomienda almacenarlo en sacos de material transpirable o en silos bien ventilados para prevenir la acumulación de gases inflamables. Además, es fundamental mantenerlo alejado de fuentes de calor, chispas o materiales combustibles, dado su riesgo de autoignición. El lugar de almacenamiento debe cumplir con normativas de seguridad para evitar incendios y garantizar su manejo adecuado (FAO, 1983).

El almacenamiento de carbón vegetal en pila es una práctica común, pero requiere cuidados específicos para garantizar seguridad y calidad. Las pilas deben ubicarse en áreas secas y bien ventiladas, sobre superficies impermeables como concreto o lonas, para evitar el contacto con humedad del suelo. Es importante cubrirlas con lonas resistentes a la intemperie para protegerlas de la lluvia, pero permitiendo cierta ventilación para evitar la acumulación de gases inflamables. Además, las pilas deben organizarse lejos de fuentes de calor, chispas y materiales combustibles, manteniendo distancias de seguridad para prevenir incendios. Esta disposición facilita el acceso al material y permite un manejo eficiente, aunque debe complementarse con inspecciones regulares para detectar riesgos (FAO, 1983).

C. Azufre

El sulfuro es una sustancia amarilla que se encuentra sólida a temperatura ambiente. El azufre puro es un sólido insípido, inodoro, quebradizo, de color amarillo pálido, mal conductor de la electricidad e insoluble en agua. Reacciona con todos los metales excepto el oro y el platino, formando sulfuro; También forma compuestos con varios elementos no metálicos. Cada año se producen millones de toneladas de azufre, principalmente para la fabricación de ácido sulfúrico, que se utiliza ampliamente en la industria (Sander et al., 1984).

En Guatemala el azufre para explotación minera se encuentra principalmente en los departamentos de Quetzaltenango y Santa Rosa (Ministerio de Energía y Minas, 2021).

1. Propiedades deseadas

El azufre líquido es un elemento químico que se caracteriza por sus distintas propiedades, se puede obtener del proceso Claus.

Cuadro 6. Composición química del azufre líquido

Composición de la muestra	Composición (% m/m)
Azufre (S ₈)	99.5
Impurezas	0.5

Nota. Adaptada de Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (2000).

Cuadro 7. Características físicas del azufre líquido

Propiedad	Valor
Punto de fisión	115.21°C
Color	Marrón o rojo
Densidad	1,819 g/cm ³
Punto de ebullición	444.6°C

Nota. Adaptada de Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (2000).

2. Usos y aplicaciones

El azufre líquido proveniente del proceso Claus tiene diversas aplicaciones industriales debido a su alta pureza y propiedades versátiles. A continuación, se describen sus principales usos y aplicaciones:

- Fabricación de ácido sulfúrico: El ácido sulfúrico es ampliamente utilizado en la industria química, particularmente en la fabricación de fertilizantes
- Producción de fertilizantes: El azufre se utiliza para producir fertilizantes a base de sulfato, como el sulfato de amonio y otros compuestos ricos en azufre esenciales para mejorar la fertilidad del suelo.
- Industria petroquímica: Se emplea en la producción de disolventes, aditivos para combustibles y otros productos químicos derivados del azufre.
- Industria farmacéutica y cosmética: Como precursor en la síntesis de productos medicinales y cosméticos, incluyendo tratamientos tópicos para afecciones cutáneas
- Tratamiento de aguas residuales: En aplicaciones específicas, puede usarse para procesos de reducción de contaminantes, como sulfatos y metales pesados (Sander et al., 1984).

3. Pruebas de control de calidad para el azufre líquido

El análisis de control de calidad del azufre líquido es fundamental para garantizar su pureza y cumplimiento con las especificaciones requeridas en diferentes aplicaciones industriales. Las pruebas más comunes incluyen las siguientes:

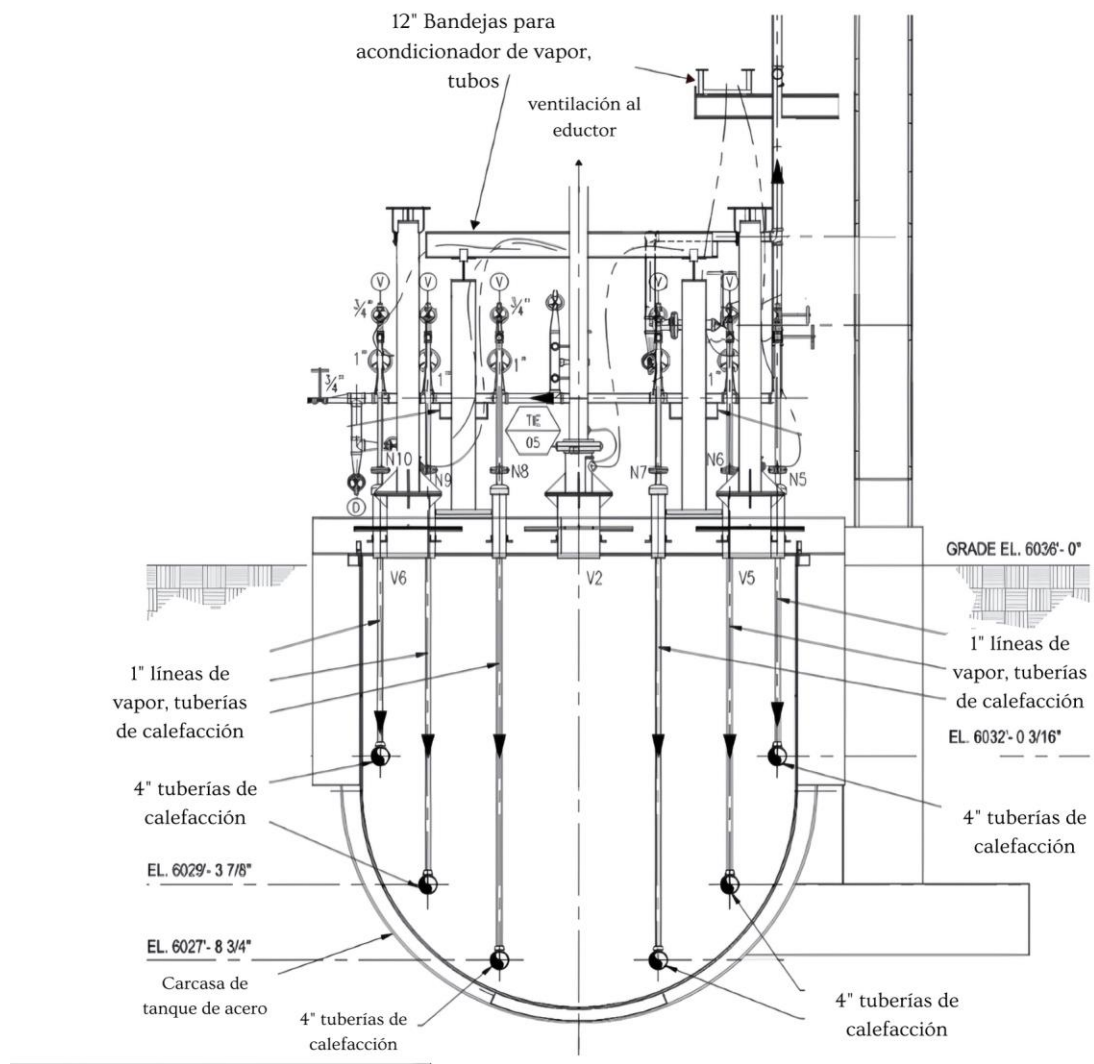
- Pureza del azufre: Determinación del porcentaje de azufre elemental por medio de Espectroscopia de emisión atómica o cromatografía de gases.
- Viscosidad: Es fundamental para aplicaciones que requieren un flujo controlado. Varía según la temperatura. Se realiza por medio de un viscosímetro rotacional.
- Humedad: Se evalúa el contenido de agua, ya que el agua residual puede afectar su almacenamiento y estabilidad. Se realiza por medio de un Análisis Karl Fischer. De igual manera se puede realizar un monitoreo de vapores peligrosos, como H₂S, bajo diferentes condiciones de almacenamiento y manipulación. (Nengovhela R. N., 2009)

4. Almacenamiento

El almacenamiento del azufre líquido requiere condiciones específicas para garantizar su seguridad, estabilidad y calidad. Debe mantenerse en tanques especializados fabricados con materiales resistentes a la corrosión, como acero inoxidable o aleaciones revestidas, capaces de soportar temperaturas controladas entre 120 °C y 160 °C para evitar su solidificación. Es crucial que estos tanques estén equipados con sistemas de calentamiento

y aislamiento térmico para mantener una temperatura uniforme, así como con sistemas de ventilación para manejar los vapores liberados, principalmente SO₂ y H₂S. Además, los depósitos deben estar ubicados en áreas alejadas de fuentes de ignición y contar con medidas de seguridad, como detección de gases tóxicos, supresión de incendios y protocolos de emergencia, debido al carácter inflamable y tóxico del material (JEPCO, 2020).

Figura 5. Tanque de almacenamiento de azufre líquido



Nota. Adaptada de JEPCO (2020).

D. Cal hidratada

Hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), un polvo blanco blando que se utiliza ampliamente como materia prima en la industria química. Se forma cuando el óxido de calcio se mezcla con agua. El compuesto tiene dos iones hidróxido (OH^-) por cada ion de calcio (Ca^{2+}). La sustancia química es iónica, con disociaciones acuosas y electrolíticas que producen iones de calcio e iones de hidróxido (Stewart, 2023).

La producción de cal hidratada en Guatemala para el año 2022 fue de 9,815,185.94 kilogramos y una venta total de Q 8,984,500.20 (Muñoz & Rosal Higueros, 2022).

1. Propiedades

A continuación, se muestra un listado de características de la cal hidratada que se esperan obtener durante el proceso.

Cuadro 8. Composición química en porcentaje másico de la cal hidratada

Compuesto	Composición (% m/m)
CaO	70.6
SiO ₂	1.7
MgO	1.6
Al ₂ O ₃	0.8
Fe ₂ O ₃	0.3
SO ₃	0.6
K ₂ O	0.1
H ₂ O	24.1

2. Proceso general de producción

A continuación, se detalla el proceso conocido generalmente para la producción de cal hidratada, aunque para este trabajo de investigación no se utilizará este método.

La cal hidratada, también conocida como hidróxido de calcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$, se produce mediante un proceso químico controlado que convierte la cal viva en un material en polvo o en pasta altamente reactivo y versátil. Su fabricación implica tres etapas principales: la obtención de cal viva, la hidratación y el control del producto final (Nengovhela R. N., 2009).

Producción de cal viva:

El proceso comienza con la extracción y trituración de piedra caliza, una roca sedimentaria abundante en la naturaleza. Esta piedra se somete a un proceso de calcinación en hornos especializados, donde se calienta a temperaturas entre 900 °C y 1,000 °C. Bajo estas condiciones, el carbonato de calcio se descompone en cal viva (óxido de calcio, CaO) y dióxido de carbono (CO₂).

El producto resultante, la cal viva, se extrae del horno en forma de terrones o polvo, dependiendo del tipo de proceso utilizado (Nengovhela R. N., 2009).

Hidratación de la cal viva:

En esta etapa, la cal viva se mezcla cuidadosamente con agua en una proporción controlada para desencadenar una reacción exotérmica, conocida como apagado de la cal. La hidratación genera calor y produce un material fino y seco en forma de polvo o, en algunos casos, una suspensión pastosa dependiendo de la cantidad de agua utilizada. Este proceso puede realizarse en sistemas automatizados de alta precisión para garantizar la uniformidad del producto final (Nengovhela R. N., 2009).

Clasificación y control del producto final:

Una vez hidratada, la cal se somete a procesos de clasificación para obtener partículas de tamaño uniforme y una textura consistente. Se utilizan equipos como cribas y molinos para eliminar impurezas y ajustar la granulometría del producto final. Además, se realizan análisis químicos y físicos para asegurar que la cal hidratada cumpla con las especificaciones requeridas, como pureza, finura y contenido de humedad (Nengovhela R. N., 2009).

Almacenamiento y distribución:

El producto final se almacena en silos o recipientes sellados para protegerlo de la humedad y evitar la contaminación ambiental. Luego, se empaqueta en sacos o se transporta a granel según las necesidades del cliente. La cal hidratada se utiliza ampliamente en la construcción, el tratamiento de agua y suelos, la industria química y otras aplicaciones debido a sus propiedades reactivas y su facilidad de manejo (Nengovhela R. N., 2009).

3. Usos y aplicaciones

La cal hidratada tiene una amplia gama de usos y aplicaciones gracias a sus propiedades químicas y físicas, como su alta alcalinidad, reactividad y capacidad para neutralizar ácidos.

En la industria de la construcción, se utiliza como ingrediente en morteros y estucos, mejorando la trabajabilidad, adherencia y resistencia a la humedad. En el tratamiento de agua potable y aguas residuales, actúa como agente coagulante y alcalinizante para eliminar impurezas y controlar el pH. En la agricultura, se emplea para neutralizar la acidez del suelo, mejorar su estructura y optimizar el crecimiento de los cultivos. También es esencial en la industria química, donde sirve como reactivo para la producción de otros compuestos, como el hipoclorito de calcio, y en la industria metalúrgica, para eliminar impurezas durante la fundición de metales. Su versatilidad y accesibilidad la convierten en un material clave en múltiples sectores (Nengovhela R. N., 2009).

4. Pruebas de control de calidad para la cal hidratada

El control de calidad para la cal hidratada es importante para que tenga las propiedades deseadas y que cumpla con las propiedades deseadas y estándares para su uso en diversas aplicaciones industriales.

El control de calidad del producto se realiza tomando en cuenta los requisitos químicos dados por el Instituto de Investigación Tecnológica y de Control de Calidad (ITINTEC) o American Standards for Testing Materials (ASTM) y AASHTO para que pueda definirse el tipo de la cal hidratada a la que pertenece.

La cal hidratada es hidróxido de calcio: $\text{Ca}(\text{OH})_2$, con impurezas como: SiO_2 , M_2O_3 (Al_2O_3 y Fe_2O_3), SO_4 , CO_3 , MgO y CaO no hidratado o libres y residuos insolubles.

Tipo 1.- Cal hidratada altamente cálcica- que contenga un máximo de 4% en peso de magnesio, calculado como MgO . La verificación de estos requisitos se determina con la norma AASHTO T.

Tipo 2.- Cal dolomítica que contenga entre 4% y 36% de magnesio como MgO . La verificación de estos requisitos se determina con las normas ASTM C. (Vadillo y Ochoa, 1990).

Los requisitos para los 2 tipos de cal se señalan en los siguientes cuadros:

Cuadro 9. Requisitos químicos para tipo de cal 1

TIPO 1	Grado A	Grado B	Grado C
Alcalinidad mínima de cal hidratada % Ca (OH) ₂	90%	85%	75%
Cal no hidratada Conteo máximo como % CaO en peso	7%	8%	9%
Agua libre, máximo contenido H ₂ O	3%	3%	3%

Nota. Adaptada de Vadillo y Ochoa (1990).

Cuadro 10. Requisitos químicos para tipo de cal 2

TIPO 2	Grado A	Grado B	Grado C
CaO y MgO sobre base calcinada % mínimo	98%	96%	94%
Dióxido de Carbono %CO ₂ máximo	3%	4%	8%
Agua libre % máximo H ₂ O	3%	3%	3%

Nota. Adaptada de Vadillo y Ochoa (1990).

Cuadro 11. Clasificación de los tipos de cal según ITINTEC

Según AASHTO T (192)	GRADO A	GRADO B	GRADO C
Max. Residuo sobre tamiz #30	2%	3%	4%
Máximo residuo en tamiz #200	12%	14%	18%
Según ITNTEC	Altamente Cálcica	Cálcica	Dolomítica
Residuo obtenido sobre tamiz #30	No mayor de 0.5%		
Residuo obtenido sobre tamiz #200	No mayor de 15%		

Nota. Adaptada de Vadillo y Ochoa (1990).

Cuadro 12. Impurezas de los tipos de cal

Tipo 1 Según Norma AASHTO T (129)	Tipo 2 Según ASTM C (25)	Según ITINTEC
Determinación de: a. Alcalinidad de Hidróxidos aparente. b. Alcalinidad total f. Pérdida por ignición. Sustancias Obtenidas: a. CaCO b. Ca (OH) ₂	Determinación de: a. Sílice + Residuo Insoluble b. M ₂ O ₃ (Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃) c. CaO d. MgO e. SO ₃ f. CO ₂ g. Humedad h. Pérdida por Ignición Sustancias Calculadas a. CaCO b. Ca (OH) ₂ c. MgCO d. Mg (OH) ₂ e. CaSO ₄ f. CaO y MgO libres	Determinación de: a. Humedad b. Material Insoluble + SiO ₂ c. Pérdida por Ignición. d. CaO e. MgO f. SO ₃ g. CO ₂ Sustancias Calculadas a. Ca (OH) ₂ b. MgO y CaO libre c. CaCO ₃ d. CaSO ₄

Nota. Adaptada de Vadillo y Ochoa (1990).

Los métodos para la determinación de estas impurezas no varían en muchos casos. Según las normas se utilizan los mismos métodos. Para la determinación de calcio, se utiliza el método gravimétrico y el volumétrico con KMnO₄. Usando EDTA (Acido Etilen Diamino Tetracético) por titulación complejométrica el método es mucho más rápido y eficaz. Igualmente, para el caso del hierro y aluminio se utiliza el método gravimétrico y luego por separación se obtienen Al₂O₃ y Fe₂O₃ separados, con el método complejométrico y utilizando EDTA, se ahorra tiempo y es mucho más eficaz. Al determinar el CO₂, se verá que es mucho más exacto el método gasométrico que el de la titulación porque éste se presta a muchos errores, y hay CO₂ que hace provoca que se carbonate rápidamente la muestra (Vadillo y Ochoa, 1990).

5. Almacenamiento

El almacenamiento de cal hidratada debe realizarse en condiciones que preserven su calidad y eviten su degradación, ya que es altamente higroscópica y puede absorber humedad del ambiente, lo que afecta sus propiedades químicas y físicas. En instalaciones

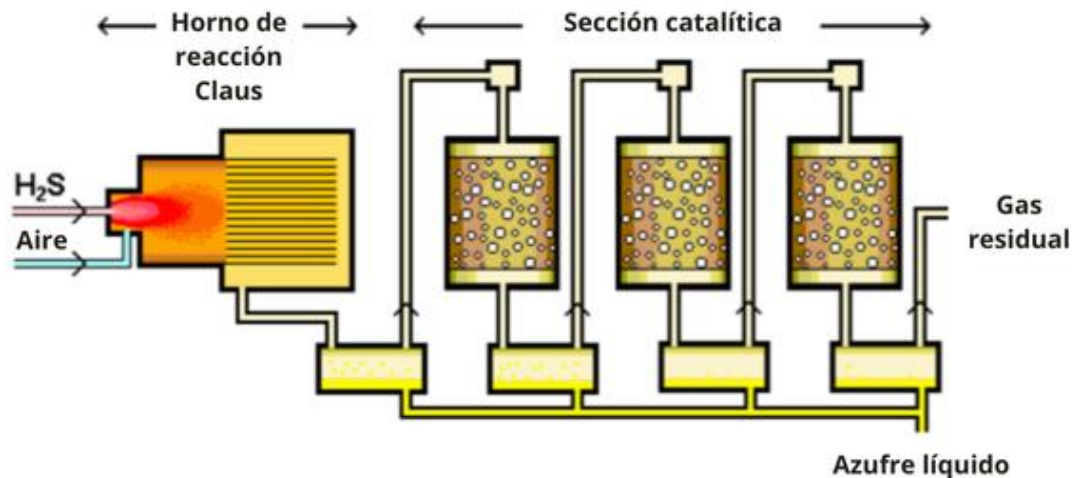
a granel, se utiliza silos sellados y ventilados, diseñados para proteger el material de la humedad y mantenerlo seco. Cuando la cal hidratada se almacena en sacos, estos deben colocarse sobre tarimas elevadas y alejadas del suelo para evitar el contacto con superficies húmedas. Es fundamental que los sacos se mantengan en áreas cubiertas, protegidas de la lluvia y la exposición directa a la humedad ambiental. Los almacenes deben estar ventilados para minimizar la condensación y evitar que el material se compacte o forme grumos, lo que podría dificultar su manejo y aplicación. Además, se debe rotar el inventario para garantizar el uso del material más antiguo primero y evitar deterioros (Vadillo y Ochoa, 1990).

E. Descripción de proceso Claus

La reacción de Claus consiste en H_2S y dióxido de azufre (SO_2) que reaccionan en la fase de vapor para producir azufre y agua. Primero se separa el H_2S de la corriente de gas huésped mediante extracción con aminas. Luego se alimenta a la unidad Claus, donde se convierte en dos pasos. El primer paso es el paso térmico, donde se oxida un tercio del H_2S , produciendo H_2S y SO_2 en una proporción de 2:1. Esto se hace en un horno de reacción a altas temperaturas (1 000-1 400 °C) (Nengovhela R. N., 2009).

Se forma algo de azufre, pero el H_2S restante sin reaccionar pasa a el siguiente paso, el paso catalítico. El esquema del proceso es el siguiente:

Figura 6. Proceso Claus



Nota. Adaptada de Negovhela (2009).

El azufre líquido producido se puede reutilizar en la planta. Los gases de escape efluentes contiene SO_2 , disulfuro de carbono (CS_2) y sulfuro de carbonilo (COS), que son subproductos producidos en los reactores Claus (Nengovhela R. N., 2009).

La reacción de Claus continúa en el paso catalítico con alúmina activada o dióxido de titanio y sirve para aumentar el rendimiento de azufre. El H_2S restante es reaccionó con el SO_2 formado en el paso térmico a menor temperaturas (200-350 °C) sobre un lecho de catalizador para producir más azufre (Nengovhela R. N., 2009).

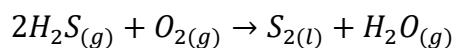
La recuperación catalítica de azufre consta de tres partes: calentamiento, reacción catalítica y enfriamiento más condensación. La primera etapa en el proceso catalítico es el calentamiento del gas. Es necesario prevenir la condensación del azufre en el lecho del catalizador, ya que puede provocar suciedad en el catalizador. La temperatura de funcionamiento del lecho requerida en las etapas catalíticas individuales se logra calentando el gas de proceso en un recalentador hasta alcanzar el nivel operativo deseado (Nengovhela R. N., 2009).

La temperatura de funcionamiento típicamente recomendada de la primera etapa del catalizador es 315-330 °C (temperatura del lecho inferior). La conversión catalítica se maximiza a temperaturas más bajas, pero se debe tener cuidado para garantizar que esté operado por encima del punto de rocío del azufre. Las temperaturas de funcionamiento de las etapas catalíticas posteriores suelen ser de 240 °C para la segunda etapa y 200 °C para la tercera etapa (temperaturas del lecho inferior) (Nengovhela R. N., 2009).

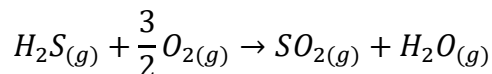
En el condensador de azufre, el gas de proceso procedente del reactor catalítico es enfriado entre 150-130 °C. El calor de condensación se utiliza para generar vapor en el lado de la carcasa del condensador. Antes del almacenamiento las corrientes de azufre líquido desde el enfriador y luego condensador; son conducidos al sistema de desgasificación, unidad donde se eliminan los gases (principalmente H_2S) disueltos en el azufre (Nengovhela R. N., 2009).

El gas de cola del proceso Claus todavía contiene componentes combustibles y compuestos de azufre (H_2S , H_2 y CO) se queman en una incineración unidad o se desulfura adicionalmente en una unidad de tratamiento de colas de gases (Nengovhela R. N., 2009).

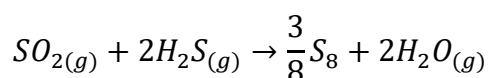
Ecuación 4. Reacción de proceso Claus



Etapa térmica:



Etapa catalítica



F. Proceso PIPco

El proceso PIPco es un proceso patentado y ofrece un gran potencial para convertir gas H₂S en azufre líquido no contaminado en una manera amigable con el medio ambiente y económica (Nengovhela R. N., 2009).

La única materia prima del proceso PIPco es el gas H₂S. Durante la operación, KOH y citrato de potasio se añaden como productos químicos de maquillaje. Los principales subproductos son el sulfato de potasio (que puede utilizarse como fertilizante); también, agua. El núcleo del proceso es el citrato de potasio, solución que se utiliza para absorber selectivamente SO₂ en agua. Esta solución se pone en contacto con H₂S para formar azufre líquido elemental. El SO₂ no es agregado al proceso desde una fuente externa, pero se genera dentro del proceso (Nengovhela R. N., 2009).

Este proceso está relacionado con el proceso de fosfato de sodio y el proceso de citrato de sodio. Ambos utilizan un tampón (sodio fosfato y citrato de sodio, respectivamente) para absorber SO₂, que luego se utiliza como agente oxidante para convertir H₂S en azufre elemental. Sin embargo, a diferencia del proceso PIPco, estos se llevan a cabo a baja temperatura y producen azufre elemental sólido en lugar de azufre líquido (Nengovhela R. N., 2009).

G. Operaciones unitarias

Las operaciones unitarias es una manera conveniente para organizar la materia de estudio que abarca la ingeniería química y esta se basa en dos hechos: 1) que los procesos pueden ser fragmentados en una serie de etapas, denominadas operaciones que se repiten a lo largo de los procesos. 2) las operaciones individuales tienen técnicas comunes y se basan en los mismos principios científicos. En la mayoría de los procesos se requiere mover los sólidos y los fluidos; transferir calor u otras formas de energía de una sustancia a otra, realizando operaciones como el secado, reducción de tamaño, evaporación, destilación, etc. Por medio del estudio sistemático de estas operaciones en sí mismos se hace evidente que constituyen la trama de la industria y las líneas de producción, se unifica y simplifica el tratamiento de los procesos (McCabe et al., 2007).

Las operaciones unitarias son aplicables a mucho proceso tanto físicos como químicos, siendo estas utilizadas ampliamente para realizar las etapas físicas fundamentales de la preparación de reactantes, separación y purificación de productos, recirculación de los reactantes no convertidos, y para controlar la transferencia de energía hacia o desde el reactor químico. Aunque las operaciones unitarias son una rama de la ingeniería, se basan de igual manera en la ciencia y la experiencia. Los aspectos estrictamente químicos de los procesos se estudian en un área compatible de la ingeniería química llamada cinética de la reacción (McCabe et al., 2007).

1. Reducción de tamaño

El término de reducción de tamaño se aplica a las diferentes formas en las que las partículas de sólidos se pueden cortar o romper en piezas más pequeñas. En un proceso industrial este se puede llevar a cabo de maneras distintas y con fines diferentes. Por ejemplo, las piedras grandes de un mineral se reducen hasta tener un tamaño manejable y si se requiere como un producto químico para reacciones debe quedar reducido a polvo. Esto es lo que sucede con el carbono y yeso dihidratado, que deben reaccionar para dar la formación de sulfuro de calcio. Esto ya que la reducción del tamaño de partícula incrementa la reactividad de los sólidos; lo cual permite la separación por métodos mecánicos de los ingredientes no deseados y el facilitar el depósito de desperdicios (McCabe et al., 2007). Por esta razón en la investigación llevada a cabo por Ryneth Nkhangweleni Nengovhela

titulado *The recovery of sulphur from waste gypsum* se recomienda un tamaño de partícula de 380 μm para que se lleve a cabo la reacción entre el yeso dhidratado y el carbono (Nengovhela R. N., 2009).

Los sólidos pueden romperse de diferentes maneras, pero generalmente se ocupan estas cuatro maneras en los equipos de reducción de tamaño: compresión, impacto, frotación o rozamiento y corte. En general, la compresión se utiliza para la reducción gruesa de sólidos duros, dando lugar a pocos finos; el impacto genera productos gruesos, medios o finos dependiendo del equipo; el rozamiento genera productos muy finos a partir de materiales blandos no abrasivos y el corte da lugar a un tamaño definido de partícula y en algunas ocasiones también se puede definir la forma deseada teniendo pocos o nada de finos (McCabe et al., 2007).

1.1 Trituradora

La trituradora es un equipo utilizado para la reducción inicial del tamaño de materiales sólidos. Su función principal es descomponer grandes fragmentos de roca, mineral u otros sólidos en partículas más pequeñas y manejables. Existen varios tipos de trituradoras, como las de mandíbula, cono y de impacto, que se seleccionan según las características del material, como su dureza, abrasividad y tamaño inicial. Este proceso es crucial para preparar los materiales para etapas posteriores como molienda, transporte o clasificación. Entre las trituradoras se encuentra las trituradoras de mandíbulas se utilizan para triturar materiales duros y abrasivos, como rocas y minerales. Funcionan mediante la compresión del material entre dos placas, una fija y otra móvil, lo que permite la reducción del tamaño del material a partículas más pequeñas (McCabe et al., 2007).

1.2 Molino de bolas

El molino de bolas es un equipo de molienda fina que utiliza bolas de acero, cerámica u otros materiales como medio de reducción. El material se introduce en un tambor giratorio, donde las bolas impactan y muelen el material hasta alcanzar el tamaño deseado. Este equipo es ampliamente utilizado en industrias como la minería, la producción de cemento y la fabricación de materiales cerámicos debido a su capacidad para manejar grandes volúmenes y obtener partículas uniformes (McCabe et al., 2007).

2. Transporte de sólidos

El transporte de sólidos es fundamental para movilizar materiales a través de las diferentes etapas de un proceso industrial. Existen diversos sistemas diseñados para manejar sólidos de forma eficiente y segura, dependiendo de las características del material y la distancia a cubrir (McCabe et al., 2007).

2.1 Bandas transportadoras

Las bandas transportadoras son sistemas continuos que permiten mover sólidos de forma horizontal o inclinada. Consisten en una banda flexible montada sobre rodillos, impulsada por un motor. Son ideales para transportar materiales granulares o triturados, como minerales, arena y grano, ofreciendo alta eficiencia y capacidad de carga. Además, permiten recorridos largos con bajo mantenimiento (McCabe et al., 2007).

2.2 Elevadores de canchilones

Los elevadores de canchilones son dispositivos verticales utilizados para transportar materiales sólidos en gránulos o polvos, como cemento, granos o minerales. Funcionan mediante una serie de canchilones fijados a una correa o cadena que los lleva desde un punto inferior hasta un nivel superior. Son ideales para espacios reducidos y permiten una transferencia controlada del material (McCabe et al., 2007).

2.3 Camión de volteo

El camión de volteo es un vehículo utilizado para transportar grandes volúmenes de materiales sólidos, como tierra, grava, minerales o desechos industriales. Su diseño incluye una tolva basculante que permite la descarga rápida y eficiente del contenido en el lugar de destino. Es ampliamente utilizado en minería, construcción y obras civiles (McCabe et al., 2007).

2.4 Criba vibratoria

La criba vibratoria es un equipo utilizado para la separación y clasificación de materiales sólidos según su tamaño. Consiste en una malla vibratoria que permite el paso de partículas más pequeñas mientras retiene las más grandes. Este equipo es esencial en la preparación de materiales, como minerales y agregados, antes de procesos posteriores como molienda o transporte (McCabe et al., 2007).

3. Almacenamiento de sólidos

El almacenamiento adecuado de sólidos es crucial para mantener la calidad del material, facilitar su manejo y optimizar los procesos industriales. Los sistemas de almacenamiento varían según la naturaleza del material, el volumen y las necesidades específicas de cada operación (McCabe et al., 2007).

3.1 Tolvas

Las tolvas son recipientes cónicos o piramidales diseñados para almacenar materiales sólidos y facilitar su descarga controlada. Son comunes en la industria minera y de construcción, permitiendo manejar materiales como grava, arena y minerales. Su diseño evita atascos y asegura un flujo continuo hacia los procesos posteriores (McCabe et al., 2007).

3.2 Pilas de almacenaje

Las pilas de almacenaje son una solución económica para almacenar grandes volúmenes de sólidos a granel, como carbón, minerales o productos agrícolas. Se forman al apilar el material en áreas abiertas o bajo techo, utilizando equipos como cargadores frontales o cintas transportadoras. Aunque son simples, requieren medidas de protección contra la humedad y el viento para evitar pérdidas o contaminación (McCabe et al., 2007).

3.3 Silos de descarga

Los silos son estructuras verticales diseñadas para el almacenamiento y descarga controlada de sólidos, como cemento, granos o minerales finos. Están construidos con materiales como acero o concreto y cuentan con sistemas de descarga que pueden incluir válvulas, sinfines o vibradores para evitar atascos. Los silos protegen el material de factores ambientales, como humedad y contaminación (McCabe et al., 2007).

4. Horno rotativo

Los hornos rotatorios son esenciales en industrias como la producción de cemento, metalurgia y química. Se clasifican según sus diseños y métodos operativos, los cuales están adaptados para maximizar la eficiencia del proceso térmico.

4.1 Tipos de hornos rotativos

Hornos Húmedos

Los hornos húmedos están diseñados para procesar materias primas en forma de

lechada, con un contenido de humedad que puede alcanzar hasta el 40%. Este diseño es común en la industria del cemento, donde los materiales se mezclan en un estado semilíquido para garantizar una mayor homogeneidad antes de la calcinación. Aunque son eficaces para mezclar y procesar materiales húmedos, su consumo energético es elevado debido a la necesidad de evaporar grandes cantidades de agua durante el proceso.

Hornos Secos Largos

Los hornos secos largos trabajan con materias primas secas o presecadas, eliminando la etapa de evaporación de agua que caracteriza a los hornos húmedos. Estos hornos son extensos y operan con flujos de calor y gases optimizados. Son más eficientes energéticamente que los hornos húmedos y se utilizan en procesos de calcinación en industrias como la producción de cemento o cal viva.

Hornos Secos Cortos

Los hornos secos cortos son versiones más compactas de los hornos secos largos y suelen integrarse con sistemas de precalentadores y precalcinadores. Este diseño optimiza el consumo energético al aprovechar el calor de los gases de escape para pretratar el material antes de entrar en el horno principal. Son altamente eficientes y utilizados principalmente en procesos modernos de fabricación de cemento.

Enfriadores y Secadores

Los enfriadores y secadores suelen estar integrados con hornos rotatorios o funcionan como equipos complementarios.

Enfriadores: Diseñados para reducir la temperatura de los materiales procesados, como el clinker de cemento, garantizando su manejabilidad y preservación de las propiedades físicas.

Secadores: Eliminan la humedad de las materias primas antes de su ingreso al horno. Pueden operar con flujos de aire caliente directo o indirecto según la sensibilidad del material tratado.

Hornos de Calor Indirecto

Los hornos de calor indirecto separan físicamente el material procesado de los gases de combustión, permitiendo un control más preciso del ambiente térmico. Este diseño es ideal para materiales sensibles a la contaminación o reacciones químicas no deseadas con los gases de combustión. Se utilizan en la producción de compuestos químicos, metales en

polvo y materiales cerámicos.

Estos diseños se adaptan a diferentes necesidades industriales, equilibrando eficiencia energética, calidad del producto y capacidad de procesamiento. La elección de un tipo específico depende de las características del material, el proceso requerido y las limitaciones del sistema.

El movimiento transversal depende de la velocidad de rotación del horno y el objetivo es evitar la centrifugación. La centrifugación ocurre a velocidades de rotación superiores a la velocidad crítica se traduce en la adhesión de las partículas sólidas a la pared del horno y, por lo tanto, reduce la mezcla y la transferencia de calor a las partículas, ya que la mayor parte de la transferencia de calor ocurre cuando las partículas entran en contacto con el gas caliente (Popescu, 2016).

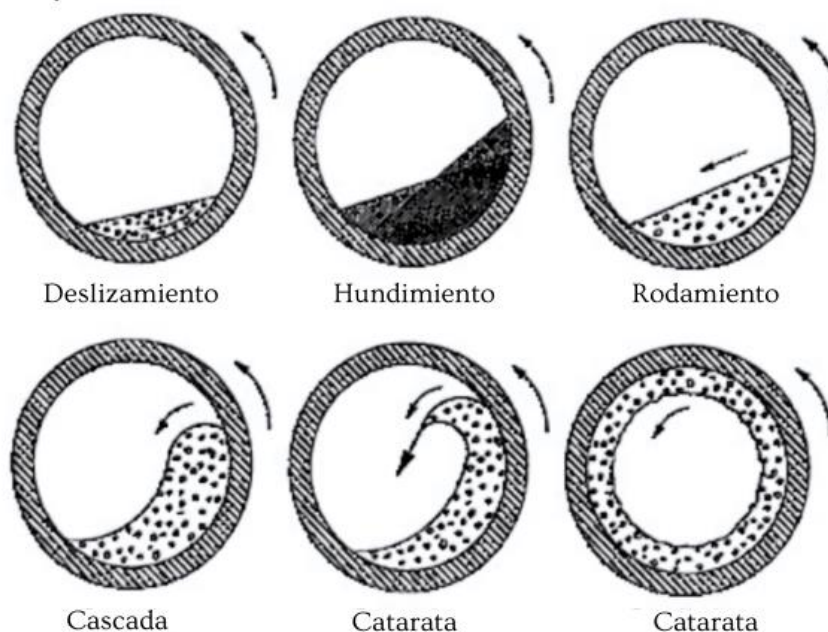
Es fundamental mencionar en este punto que, si bien la transferencia de calor es mejor a través de la conducción desde el aire, los movimientos en cascada y en catarata pueden causar problemas de desgaste y polvo, por lo que no son deseables. En el otro extremo del espectro, el deslizamiento y el hundimiento pueden causar vibraciones severas en el horno, lo que tampoco es deseable para un equipo tan pesado. Por lo tanto, la velocidad de rotación de la operación debe ser tal que el movimiento transversal se ajuste a la región de laminación. La laminación no solo evita los problemas antes mencionados, sino que también garantiza una mezcla maximizada de las partículas, exactamente lo que deseamos para el proceso de transferencia de calor. A continuación, se muestra un cuadro con los valores del número de Froude dependiendo del tipo de movimiento transversal.

Cuadro 13. Número de Froude para distintos tipos de movimiento transversal

Modo	$Fr (= \omega^2 R/g)$ a $\theta = 35^\circ$
1. Deslizamiento (Slipping)	$Fr < 1.0 \times 10^{-5}$
2. Hundimiento (Slumping)	$1.0 \times 10^{-5} \leq Fr \leq 0.3 \times 10^{-3}$
3. Rodamiento (Rolling)	$0.5 \times 10^{-3} \leq Fr \leq 0.2 \times 10^{-1}$
4. Cascada (Cascading)	$0.4 \times 10^{-1} < Fr \leq 0.8 \times 10^{-1}$
5. Catarata (Cataracting)	$0.9 \times 10^0 < Fr < 1$
6. Centrifugado (Centrifuging)	$Fr > 1.0$

Nota. Adaptada de Henein (1980).

Figura 7. Tipos de movimiento trasversal

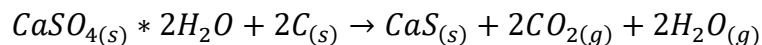


Nota. Adaptada de Henein (1980).

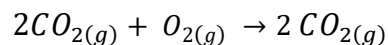
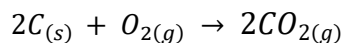
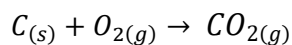
4.2 Reacción de calcinación de sulfato de calcio a sulfuro de calcio

La reducción carbotérmica del sulfato de calcio (CaSO_4) a sulfuro de calcio (CaS) es un proceso químico en el que el sulfato de calcio se reduce utilizando carbono (como carbón o coque) como agente reductor, a altas temperaturas. Este método se utiliza principalmente en aplicaciones industriales, como la producción de compuestos sulfurados o en procesos de reciclaje de desechos que contienen sulfatos.

Ecuación 5. Reacción de reducción de sulfato de calcio a sulfuro de calcio



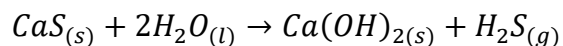
Reacciones secundarias



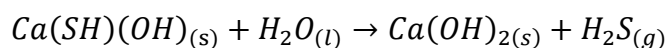
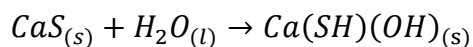
(Nengovhela R. N., 2009)

5. Reacción de hidrólisis

Ecuación 6. Reacción de hidratación



Mecanismo de reacción:



H. Escala de laboratorio, escala de planta piloto y escala industrial

1. Escala de laboratorio

Fase inicial de experimentación y desarrollo de procesos químicos o físicos, donde se realizan pruebas y estudios en equipos pequeños, generalmente en volúmenes limitados y controlados. En esta etapa, los experimentos se llevan a cabo utilizando instrumentos de laboratorio como matraces, tubos de ensayo, reactores pequeños, y otros dispositivos que permiten analizar las propiedades y comportamientos de los materiales o sustancias a pequeña escala (Anaya-Durand & Pedroza-Flores, 2008).

2. Escala de planta piloto

Una planta piloto se define como un conjunto de equipos ensamblados que operan de manera integrada para simular, a escala reducida, procesos industriales. En estas instalaciones se pueden estudiar diferentes fenómenos, tanto simples como complejos, que son de interés en la ingeniería química, como la termodinámica, el flujo de fluidos, la transferencia de masa y energía, las reacciones químicas, la biotecnología y el control de procesos, entre otros (Anaya-Durand & Pedroza-Flores, 2008).

Estas plantas permiten analizar cómo interactúan estas operaciones, facilitando su

aplicación en entornos industriales o en áreas específicas de trabajo. Además, sirven como un puente entre la teoría (modelos matemáticos) y la práctica, permitiendo realizar experimentos y comprobaciones en las áreas de conocimiento mencionadas. El uso de plantas de proceso a escala piloto tiene como propósitos principales:

- Predecir el comportamiento de una planta industrial al operar una planta piloto en condiciones similares a las que se espera encontrar a gran escala. Los datos recopilados en esta fase son fundamentales para el diseño de la planta industrial (Anaya-Durand & Pedroza-Flores, 2008).

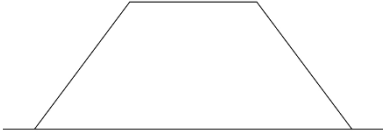

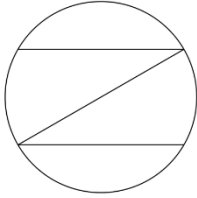
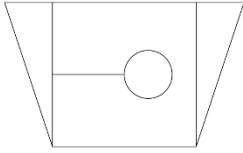

- Analizar el funcionamiento de plantas industriales ya existentes, utilizando la planta piloto como un modelo a escala. En este contexto, la planta piloto simula las condiciones de operación de la planta real, permitiendo estudiar los efectos de cambios operativos de manera más eficiente y económica que si se hicieran directamente en la planta industrial (Anaya-Durand & Pedroza-Flores, 2008).

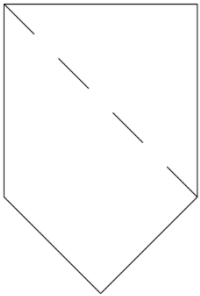
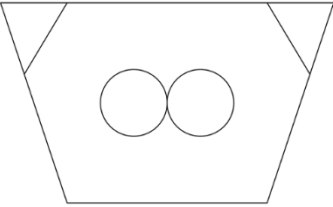
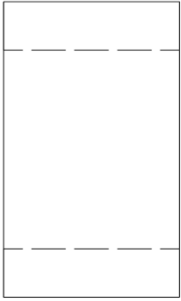
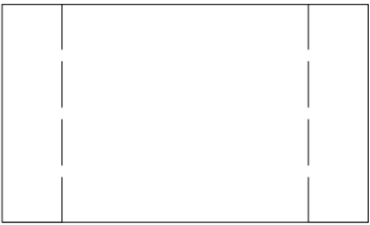
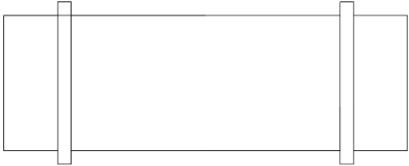
3. Escala industrial

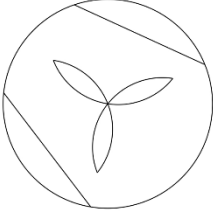
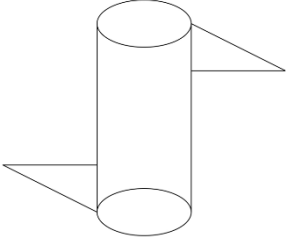
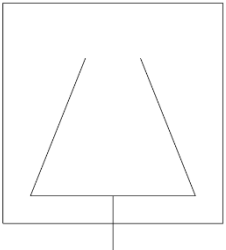
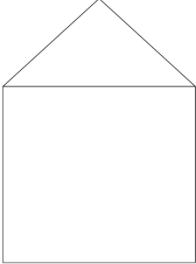
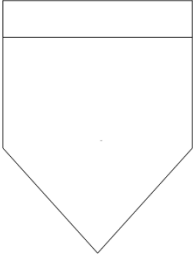
Escalar un proceso o equipo es convertirlo de su escala de investigación (laboratorio o piloto) a escala industrial (producción). El ingeniero químico es el profesional capacitado para llevar este nuevo producto al mercado mediante el escalamiento; analizar las condiciones de reacción y los factores de influencia para definir los equipos necesarios (bombas, intercambiadores de calor, reactores, etc.) y proponer el proceso de producción en masa del producto (Anaya-Durand & Pedroza-Flores, 2008).

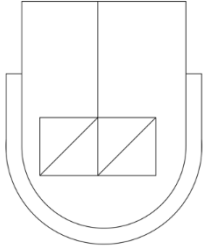
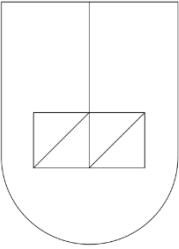
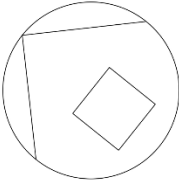
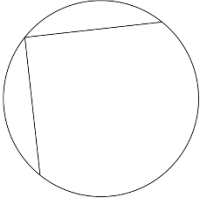
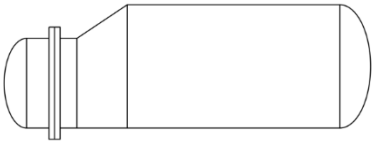
G. Diagrama de flujo

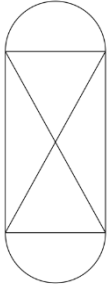
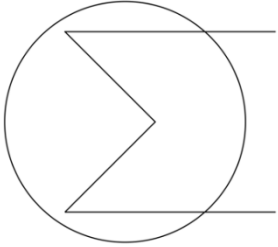
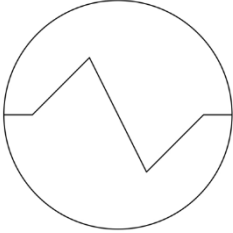
Cuadro 14. Simbología de equipos utilizados en los diagramas

Símbolo	Significado
	Pila de almacenamiento
	Tolva
	Alimentador
	Trituradora de mandíbula
	Transportador de banda

Símbolo	Significado
	Criba vibratoria
	Molino de bolas/ Molino de alta presión
	Precalentador vertical
	Enfriador rotatorio
	Horno rotatorio

Símbolo	Significado
	Ventilador
	Elevador de canjilones
	Centrífuga
	Tanque de almacenamiento o empaque
	Ciclón

Símbolo	Significado
	<p>Reactor CSTR con chaqueta</p>
	<p>Reactor CSTR</p>
	<p>Bomba de desplazamiento positivo</p>
	<p>Bomba centrífuga</p>
	<p>Reactor térmico/ Caldera de recuperación de calor</p>

Símbolo	Significado
	Reactor catalítico
	Calentador
	Condensador

Nota. Elaboración propia basada en ISO 1417

V. ANTECEDENTES

En la investigación llevada a cabo por Ryneth Nkhangweleni Nengovhela titulado *The recovery of sulphur from waste gypsum* el objetivo del proyecto era evaluar un proceso para convertir el yeso residual en azufre. El proceso evaluado consta de las siguientes etapas: reducción de yeso a sulfuro de calcio; extracción del sulfuro con gas CO₂ y producción de azufre. El estudio de reducción térmica demostró que el yeso se puede reducir a CaS con carbón activado en un horno tubular que funciona a 1100° C. El rendimiento de CaS fue del 96%. El CaS formado se suspendió en agua. La reacción del CO₂ gaseoso con la suspensión de CaS conduce a la extracción de sulfuro para formar gas H₂S y la precipitación de CaCO₃. El H₂S generado luego se hizo reaccionar en los procesos de hierro (III) y PIPco para formar azufre elemental. En este estudio se recuperó azufre con una pureza de entre 96% y 99% del yeso residual (Nengovhela R. N., 2009).

Para realizar una propuesta del diseño de una planta piloto se requiere conocer la materia prima. En el artículo científico realizado por C.A Strydom y J.H Potgieter titulado *Dehydration behaviour of a natural gypsum and a phosphogypsum during milling* describe una investigación sobre el comportamiento de deshidratación de un yeso natural y un yeso fosfórico en condiciones isotérmicas. El objetivo del trabajo fue evaluar si existe diferencia en el comportamiento de deshidratación y qué efectos podría tener en aplicaciones prácticas, lo cual es de utilidad para estimar las pérdidas que se podrían tener por la reducción de tamaño de las rocas de yeso naturales (Strydom & Potgieter, 1999).

Entre los equipos a dimensionar para este trabajo se encuentra un horno rotatorio para lo cual el estudio *Design of Rotary Kiln for Cristobalite Production* escrito por Adina Popescu fue de utilidad para conocer las ecuaciones adecuadas y realizar el balance de energía del equipo. El trabajo presenta los cálculos detrás de un diseño detallado del proceso capaz de generar 5 toneladas por hora de alto grado de β-Cristobalita. Este trabajo

incluye la inversión total tomando en cuenta los costos fijos y el capital de trabajo, lo cual fue menor a 6 millones de libras esterlinas (Popescu, 2016) .

El Proceso Claus es un proceso común para la recuperación de azufre a partir de gases como el sulfuro de hidrogeno que se encuentran en el gas natural. Para este trabajo de graduación se seleccionó este proceso como paso final de conversión. De manera que para realizar los balances de masa y energía de cada equipo y su dimensionamiento se utilizó el estudio titulado *Introduction to the Sweetening of Natural Gas with Emphasis on Sulfur Recovery* por Imán Shabbir, Omer Farooqi, Jahanzaib Ali Bugati, Ali Shan Malik y Osman Shaid. El cual realiza una introducción al gas natural y su procesamiento enfocándose en el proceso Claus, diseñando cada equipo y unidad necesaria para este proceso, siendo un material de sencilla adaptación para un tema complejo.

VI. METODOLOGÍA

A. Identificar operaciones unitarias y determinar base de cálculo

1. Reunir información del proceso de conversión del yeso a sulfuro de calcio y también investigar alternativas diferentes para convertir el sulfuro de hidrógeno en azufre elemental.
2. Identificar las distintas operaciones unitarias del proceso y su secuencia.
3. Encontrar base de cálculo a partir de lo proporcionado por la empresa interesada.

B. Elaboración del balance de masa y energía

1. Seleccionar los equipos que se utilizaran para los procesos.
2. Establecer condiciones de operación basados en la posible ubicación de la planta y la información recolectada.
3. Analizar las condiciones y requisitos de cada proceso para recopilar la información teórica necesaria que permita desarrollar el balance de masa y energía en cada etapa.
4. Por medio de una hoja de cálculo en Excel, determinar los flujos de entrada y salida en cada una de las etapas del proceso, se toma en cuenta la base de cálculo proporcionada por la empresa
5. Determinar la masa de materia prima que es necesaria para el proceso, haciendo uso de las cantidades estequiométricas recomendadas para las reacciones del proceso.
6. Elaborar el diagrama de bloques en Visio, tomando en cuenta los equipos utilizados y el balance de masa y energía.

C. Dimensionar y seleccionar equipos

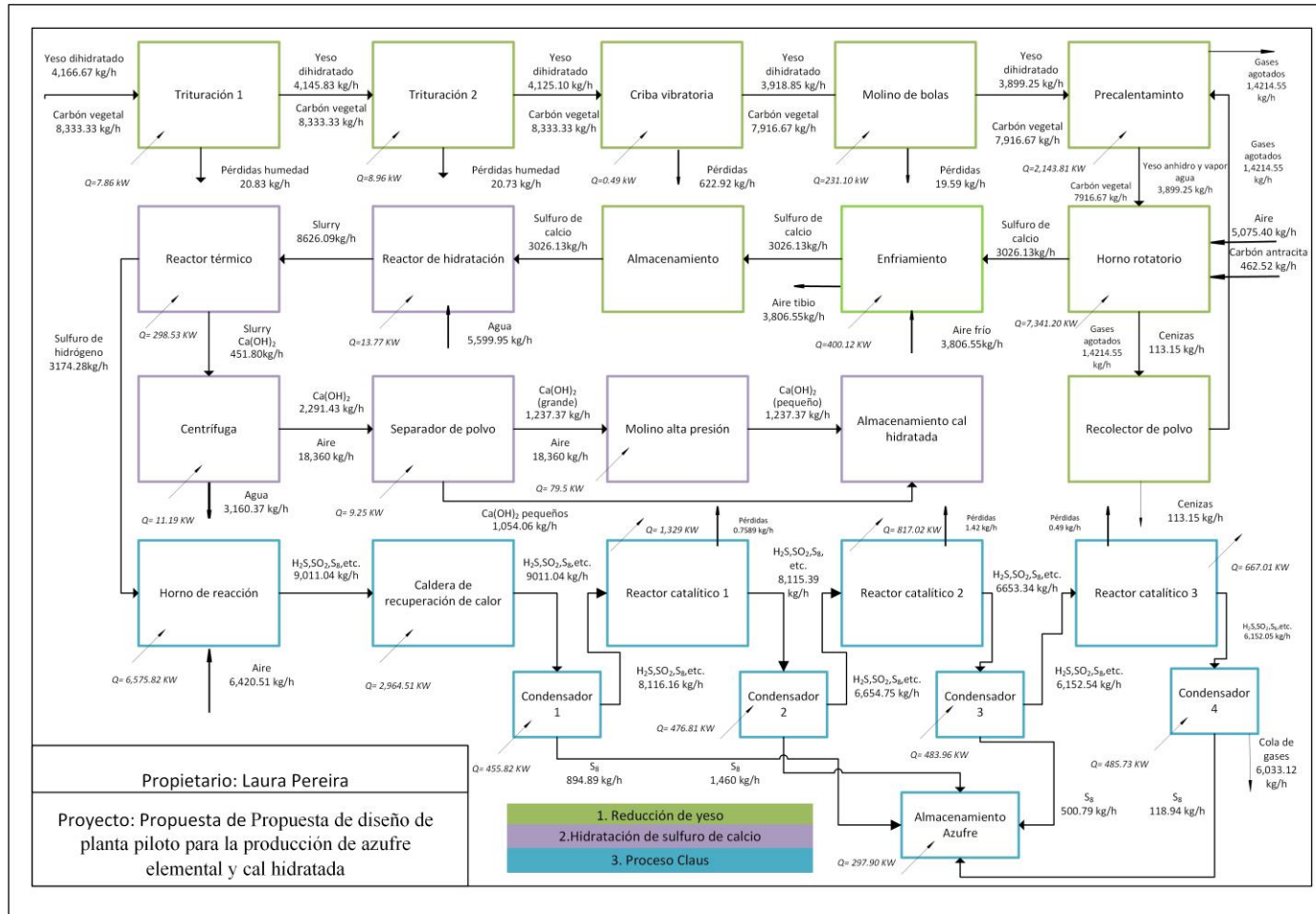
1. Con los balances de masa y energía y especificaciones del proceso, y teniendo en cuenta el área disponible, realizar investigación bibliográfica de los equipos pertinentes.
2. Seleccionar el tipo de equipos que se acoplaran al proceso
3. Dimensionar haciendo uso de los principios de ingeniería adecuados y con las ecuaciones adecuadas.
4. Revisar fichas técnicas correspondientes para evaluar la mejor opción para cada operación unitaria.
5. Comparar dimensionamiento de equipos realizado con los equipos seleccionados.
6. Determinar selección de equipos.

D. Costeo económico

1. Investigar acerca de la estimación de costos de los equipos seleccionados al cotizar los equipos o buscar estimaciones de costo de equipos.
2. Determinar los costos al decidir cuáles son las cotizaciones y costos aproximados apropiados
3. Determinar precio de venta de azufre líquido y cal hidratada
4. Estimar los costos de materia prima: yeso dihidratado, carbón vegetal y carbón antracita.
5. Estimar costos de personal
6. Estimar costos de servicios a utilizar
7. Realizar cálculos de costeo de equipos, estado de resultados, flujo de caja, valor actual neto, tasa interna de retorno y análisis de sensibilidad.

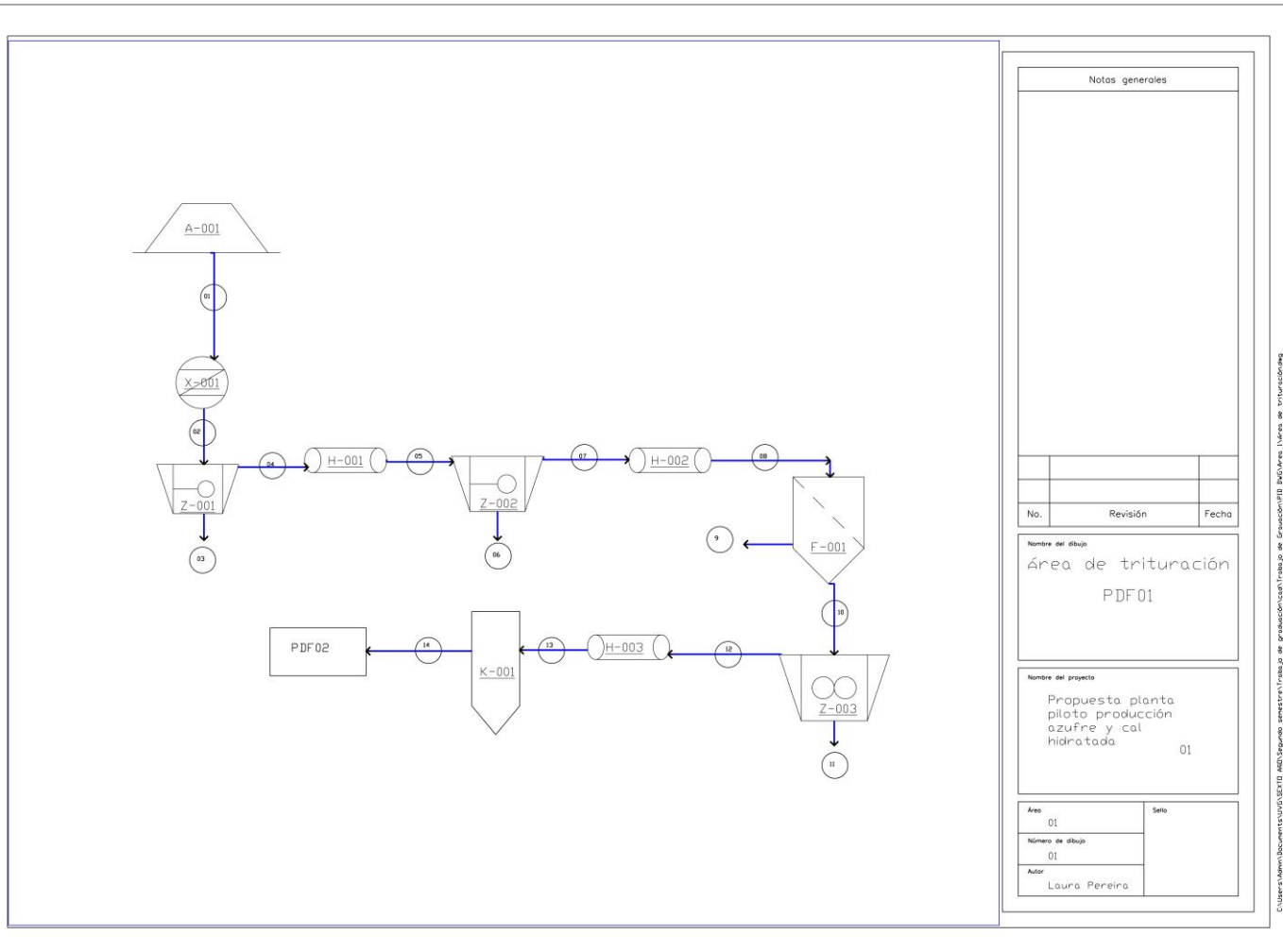
VII. RESULTADOS

Figura 8. Balance de masa y energía representado en un diagrama de bloques



Nota. Elaboración propia.

Figura 9. Diagrama de flujo de área de trituración



Nota. Elaboración propia.

Cuadro 15. Flujos de área de trituración

Flujo	Nombre flujo	Flujo másico (kg/h)	Temperatura (°C)	Presión (kPa)
1	Yeso dihidratado Carbón vegetal	4,166.67 8,333.33	25	N/A
2	Yeso dihidratado Carbón vegetal	4,166.67 8,333.33	25	N/A
3	Pérdidas por dispensabilidad y pérdida de humedad	20.83	25	N/A
4	Yeso dihidratado Carbón vegetal	4,145.83 8,333.33	25	N/A
5	Yeso dihidratado Carbón vegetal	4,145.83 8,333.33	25	N/A
6	Pérdidas por dispensabilidad y pérdida de humedad	20.73	25	N/A
7	Yeso dihidratado Carbón vegetal	4,125.10 8,333.33	25	N/A
8	Yeso dihidratado Carbón vegetal	4,125.10 8,333.33	25	N/A
9	Pérdidas por cribado	622.92	25	N/A
10	Yeso dihidratado Carbón vegetal	3,918.85 7,916.67	25	N/A
11	Pérdidas por dispensabilidad y pérdida de humedad	19.59	25	N/A
12	Yeso dihidratado Carbón vegetal	3,899.25 7,916.67	30	N/A
13	Yeso dihidratado Carbón vegetal	3,899.25 7,916.67	30	N/A
14	Yeso dihidratado Carbón vegetal	3,899.25 7,916.67	30	N/A

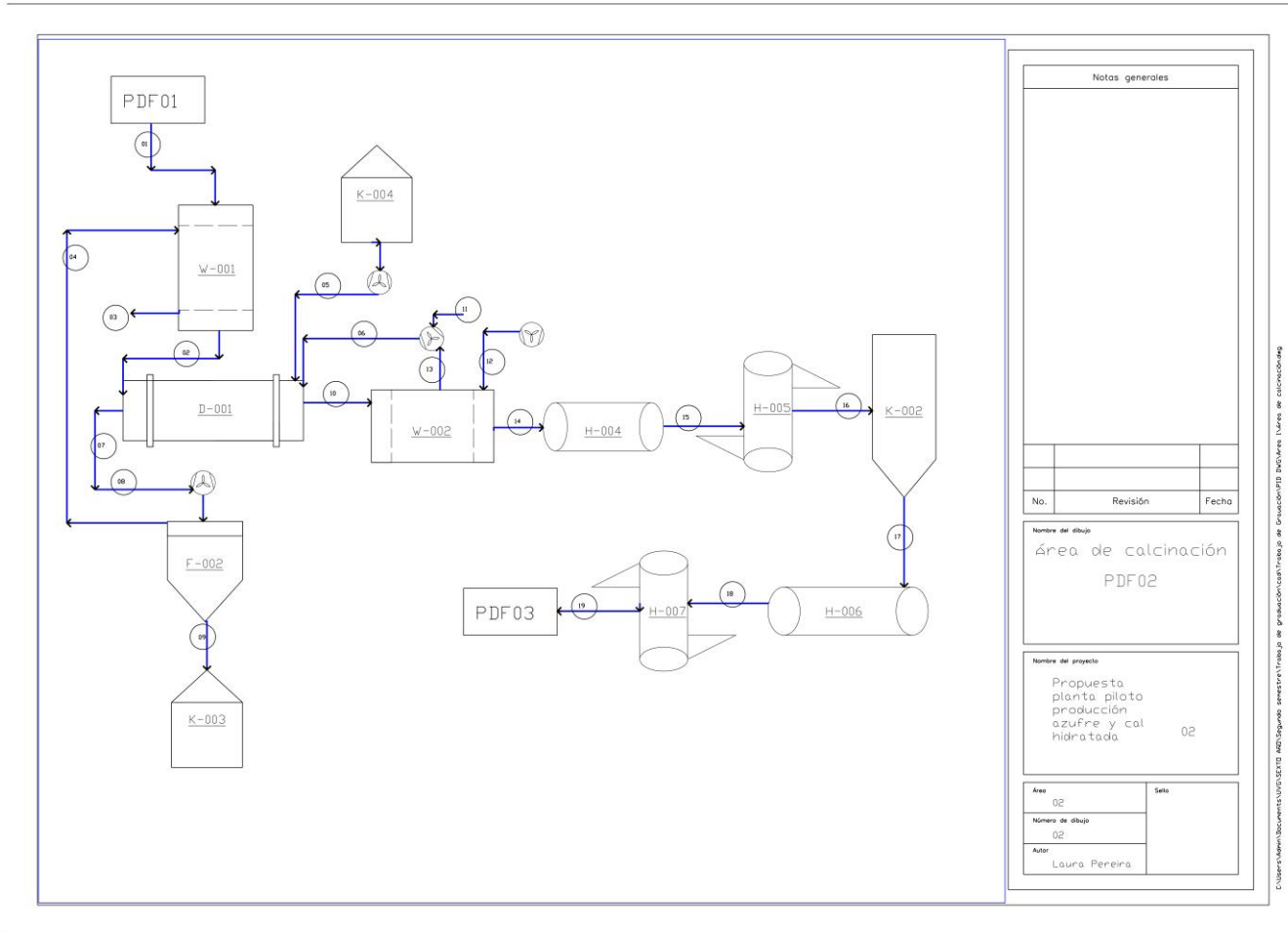
Nota. Elaboración propia.

Cuadro 16. Dimensión de equipos seleccionados para área de trituración

Código	Equipo	Dimensiones
A-001	Pila de materia prima	Almacenamiento de yeso dihidratado: 300 m ² Almacenamiento de carbón vegetal: 10,000 m ²
X-001	Alimentador banda	Longitud: 1.50 m Ancho de banda: 0.650 m Potencia: 2 kW
Z-001	Trituradora de mandíbula	Apertura de alimentación: 0.250 m*0.40 m Potencia: 15 kW
H-001	Banda transportadora	Ancho banda transportadora: 0.650 m
Z-002	Trituradora de mandíbula	Apertura de alimentación: 0.180 m*1.30 m Potencia: 30 kW
H-002	Banda transportadora	Ancho banda transportadora: 0.650 m
F-001	Criba vibratoria	Tamaño de la criba: 10.0 m*4.44 m Calibre de malla: 0.025 m
Z-003	Molino de bolas	Diámetro: 2.20 m Longitud: 3.60 m Potencia de motor: 245 kW
H-003	Banda transportadora	Ancho banda transportadora: 0.650 m
K-001	Tolva trapezoidal	Área de entrada: 4 m * 8 m Altura total: 1.875 m Altura de salida: 1.071 m Área de salida: 0.4 m* 0.4 m

Nota. Elaboración propia. El cuadro anterior muestra las dimensiones de los equipos dimensionados y/o seleccionados. Para más información y datos relevantes consultar fichas técnicas en la sección de fichas técnicas de anexos.

Figura 10. Diagrama de flujo de área de calcinación



Nota. Elaboración propia.

Cuadro 17. Flujos de área de calcinación

Flujo	Nombre flujo	Flujo másico (kg/h)	Temperatura (°C)	Presión (kPa)
1	Yeso dihidratado Carbón vegetal	3,899.25 7,916.67	30	N/A
2	Yeso anhidro Vapor agua Carbón vegetal	3,142.80 756.46 7,916.67	975	N/A
3	Gases agotados	14,214.55	300	101.3
4	Gases agotados	14,214.55	975	101.3
5	Carbón antracita pulverizado	462.52	60	N/A
6	Aire primario Aire secundario	1,268.85 3,806.55	60 760	101.3
7	Gases agotados	14,214.55	975	101.3
8	Cenizas	113.15	975	101.3
9	Cenizas	113.15	975	101.3
10	Sulfuro de calcio	3,026.12	625	N/A
11	Aire primario	1,268.85	60	101.3
12	Aire secundario	3,806.55	20	101.3
13	Aire secundario	3,806.55	760	101.3
14	Sulfuro de calcio	3,026.13	30	N/A
15	Sulfuro de calcio	3,026.13	30	N/A
16	Sulfuro de calcio	3,026.13	30	N/A
17	Sulfuro de calcio	3,026.13	25	N/A
18	Sulfuro de calcio	3,026.13	25	N/A
19	Sulfuro de calcio	3,026.13	25	N/A

Nota. Elaboración propia.

Cuadro 18. Dimensión para equipos seleccionados en área de calcinación

Código	Equipo	Dimensiones
W-001	Pre calentador vertical	Diámetro: 5 m Potencia: 2,144 kW
D-001	Horno rotatorio	Diámetro: 2.8 m Largo: 44.8 m
W-002	Enfriador rotatorio	Diámetro: 2.8 m Largo: 4.3 m
H-004	Banda transportadora	Ancho banda transportadora: 0.650 m
H-005	Elevador de canchilones	Volumen cucharón de acero: 1.21 L
K-002	Silo de almacenamiento	Diámetro: 2.08 m Altura: 1.8 m
H-006	Banda transportadora	Ancho banda transportadora: 0.650 m
H-007	Elevador de canchilones	Volumen cucharón de acero: 1.21 L
K-003	Tanque de almacenamiento	Diámetro: 6.4 m Altura: 5.7 m
F-002	Ciclón	Diámetro del cuerpo: 0.204 m Diámetro de entrada: 0.102 m Altura cuerpo cilíndrico: 0.306 m Longitud del cono: 0.503 m Diámetro de descarga polvo: 0.766 m
K-004	Tanque de almacenamiento	Diámetro: 6.4 m Altura: 5.7 m

Nota. Elaboración propia. El cuadro anterior muestra las dimensiones de los equipos dimensionados y/o seleccionados. Para más información y datos relevantes consultar fichas técnicas en la sección de fichas técnicas de anexos.

Cuadro 19. Flujo de área de reactores

Flujo	Nombre flujo	Flujo másico (kg/h)	Temperatura (°C)	Presión (kPa)
1	Sulfuro de calcio	3,026.13	25	N/A
2	Sulfuro de calcio	3,026.13	25	N/A
3	Agua	5,599.95	25	101.3
4	<i>Slurry</i> Ca (OH) ₂ y H ₂ S	8,626.08	25	N/A
5	H ₂ S	3,174.28	60	101.3
6	<i>Slurry</i> Ca (OH) ₂	5,451.81	60	N/A
7	Ca (OH) ₂	2,291.43	60	N/A
7	Aire	18,360.00	25	101.3
8	Ca (OH) ₂ menor 20 µm	1,054.06	60	N/A
9	Ca (OH) ₂ mayor 20 µm	1,237.37	60	N/A
10	Ca (OH) ₂ menor 20 µm	1,237.37	60	N/A
11	Ca (OH) ₂ menor 20 µm	1,237.37	60	N/A
12	Ca (OH) ₂ menor 20 µm	1,054.06	60	N/A
13	Agua	3,160.37	25	101.3

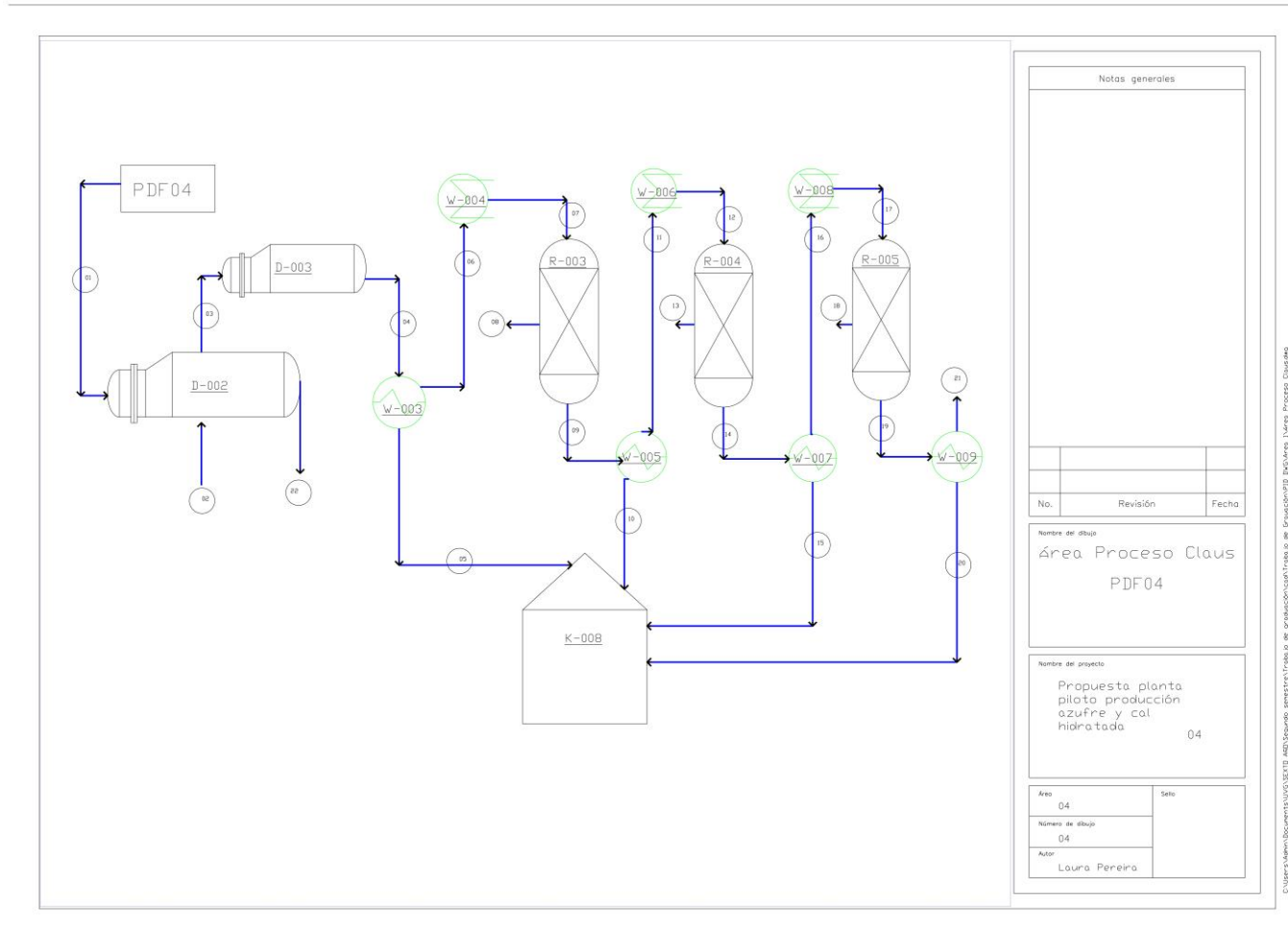
Nota. Elaboración propia.

Cuadro 20. Dimensión de los equipos seleccionados para área de reactores

Código	Equipo	Dimensiones
K-005	Tolva trapezoidal	Área de entrada: 1.2 m * 1.2 m Altura total: 1.69 m Área de salida: 0.4 m* 0.4 m
K-006	Tanque de almacenamiento	Diámetro: 9.1 m Altura: 7.3 m
R-001	Reactor de hidratación	Diámetro del equipo: 1.584 m Altura del equipo: 2.376 m Diámetro del impulsor: 0.132 m
R-002	Reactor térmico	Diámetro del equipo: 1.698 m Altura del equipo: 2.548 m Diámetro del impulsor: 0.566 m
F-003	Centrifuga	Largo: 6.502 m Ancho: 1.450 m
F-004	Separador de partículas	Potencia: 9.5 kW Revoluciones por minutos: 100-400 rpm
H-008	Banda transportadora	Ancho banda transportadora: 650 mm
H-009	Banda transportadora	Ancho banda transportadora: 650 mm
Z-004	Molino de alta presión	Diámetro: 1,050 mm Altura: 170 mm Potencia: 79.5 kW
K-007	Máquina de llenado de bolsas	Largo: 1.700 m Ancho: 0.800 m Altura: 2.350 m

Nota. Elaboración propia. El cuadro anterior muestra las dimensiones de los equipos dimensionados y/o seleccionados. Para más información y datos relevantes consultar fichas técnicas en la sección de fichas técnicas de anexos.

Figura 12. Diagrama de flujo de proceso Claus



Nota. Elaboración propia.

Cuadro 21. Flujos de área de proceso Claus

Flujo	Nombre flujo	Flujo másico (kg/h)	Temperatura (°C)	Presión (kPa)	Energía (kW)
1	H ₂ S	3,174.28	215	450.0	N/A
2	Aire	6,420.51	70	450.0	N/A
3	H ₂ S, N ₂ , SO ₂ , H ₂ O y S ₈	9011.04	1177	450.0	6,575.82
4	H ₂ S, N ₂ , SO ₂ , H ₂ O y S ₈	9011.04	649	408.0	2,964.51
5	Azufre líquido	849.89	124.4	380.4	
6	H ₂ S, N ₂ , SO ₂ , H ₂ O y S ₈	8,116.16	124.4	380.4	455.82
7	H ₂ S, N ₂ , SO ₂ , H ₂ O y S ₈	8,116.16	248.8	325.4	904.34
8	Pérdidas	0.7589	354.4	312.0	
9	H ₂ S, N ₂ , SO ₂ , H ₂ O y S ₈	8,115.40	354.4	312.0	1,329
10	Azufre líquido	1,460.64	124.4	380.4	
11	H ₂ S, N ₂ , SO ₂ , H ₂ O y S ₈	6,654.75	124.4	380.4	476.81
12	H ₂ S, N ₂ , SO ₂ , H ₂ O y S ₈	6,654.75	204.4	235.0	67.59
13	Pérdidas	1.415	243.3	224.4	
14	H ₂ S, N ₂ , SO ₂ , H ₂ O y S ₈	6,653.33	243.3	224.4	817.02
15	Azufre líquido	500.79	124.4	201.4	
16	H ₂ S, N ₂ , SO ₂ , H ₂ O y S ₈	6,152.54	124.4	201.4	483.96
17	H ₂ S, N ₂ , SO ₂ , H ₂ O y S ₈	6,152.54	196.6	152.4	628.31
18	Pérdidas	0.4901	207.2	142.7	
19	H ₂ S, N ₂ , SO ₂ , H ₂ O y S ₈	6,152.05	207.2	142.7	667.01
20	Azufre líquido	118.94	124.4	117.8	
21	H ₂ S, N ₂ , SO ₂ , H ₂ O y S ₈	6,152.54	124.4	117.8	485.73
22	Pérdidas	583.75	1177	450	

Nota. Elaboración propia.

Cuadro 22. Dimensión de quipos seleccionados para área de proceso Claus

Código	Equipo	Dimensiones
D-002	Horno de reacción	Largo: 6.10 m Diámetro externo: 1.85 m
D-003	Caldera de recuperación de calor	Área de transferencia de calor: 25.9 m ² Número de tubos: 91 Longitud del tubo: 3.6 m
W-003	Condensador	Área de transferencia de calor: 89.5 m ² Número de tubos: 170
W-004	Calentador	Área de transferencia de calor: 8.6 m ²
R-003	Reactor catalítico	Volumen del reactor: 39.14 m ³ Longitud del reactor: 7.66 m Diámetro del reactor: 2.55 m
W-005	Condensador	Área de transferencia de calor: 89.5 m ² Número de tubos: 170
W-006	Calentador	Área de transferencia de calor: 8.6 m ²
R-004	Reactor catalítico	Volumen del reactor: 39.14 m ³ Longitud del reactor: 7.66 m Diámetro del reactor: 2.55 m
W-007	Condensador	Área de transferencia de calor: 89.5 m ² Número de tubos: 170
W-008	Calentador	Área de transferencia de calor: 8.6 m ²
R-005	Reactor catalítico	Volumen del reactor: 39.14 m ³ Longitud del reactor: 7.66 m Diámetro del reactor: 2.55 m
W-009	Condensador	Área de transferencia de calor: 89.5 m ² Número de tubos: 170
K-008	Almacenamiento	Altura: 10.00 m Diámetro: 9.91 m Potencia: 60.3 kW

Nota. Elaboración propia. El cuadro anterior muestra las dimensiones de los equipos dimensionados y/o seleccionados. Para más información y datos relevantes consultar fichas técnicas en la sección de fichas técnicas de anexos.

Figura 13. Estado de resultados

AÑOS	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ventas											
Unidades vendidas (bolsa cal hidratada)		747,924	770,362	793,473	817,277	841,795	867,049	893,061	919,852	947,448	975,871
Precio de venta	Q	38.90	40.85	42.89	45.03	47.28	49.65	52.13	54.74	57.47	60.35
Unidades vendidas (Tonelada azufre líquido)		24,278	25,007	25,757	26,529	27,325	28,145	28,989	29,859	30,755	31,678
Precio de venta	Q	1,622.40	1,703.52	1,788.70	1,878.13	1,972.04	2,070.64	2,174.17	2,282.88	2,397.02	2,516.87
Ventas	Q	68,483,182.17	74,064,561.51	80,100,823.27	86,629,040.37	93,689,307.16	101,324,985.70	109,582,972.03	118,513,984.25	128,172,873.97	138,618,963.20
(+) Otros ingresos	Q	-	-	-	-	-	-	-	-	-	172,968.31
(-) Devoluciones	Q	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
(-) Descuentos	Q	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ventas netas (=)	Q	68,483,182.17	74,064,561.51	80,100,823.27	86,629,040.37	93,689,307.16	101,324,985.70	109,582,972.03	118,513,984.25	128,172,873.97	138,791,931.51
Costos de producción											
Costo materia prima (unidad)	Q	75.89	79.68	83.67	87.85	92.24	96.86	101.70	106.78	112.12	117.73
Materia prima	Q	58,602,439.64	63,378,538.47	68,543,889.36	74,130,216.34	80,171,828.97	86,705,833.04	93,772,358.43	101,414,805.64	109,680,112.30	118,619,041.45
Personal	Q	4,949,883.20	5,444,651.52	5,989,116.67	6,588,028.34	7,246,831.17	7,971,514.29	8,768,665.72	9,645,532.29	10,610,085.52	11,671,094.07
Servicios	Q	2,316,600.00	2,548,260.00	2,803,086.00	3,083,394.60	3,391,734.06	3,730,907.47	4,103,988.21	4,514,398.03	4,965,837.84	5,462,421.62
Depreciación de equipo	Q	328,639.80	328,639.80	328,639.80	328,639.80	328,639.80	328,639.80	328,639.80	328,639.80	328,639.80	328,639.80
Interés sobre préstamos	Q	207,561.98	166,049.58	124,537.19	83,024.79	41,512.40	-	-	-	-	-
Costo total de producción	Q	66,404,924.62	71,866,139.37	77,789,269.02	84,213,303.87	91,180,546.40	98,736,894.59	106,973,662.16	115,903,375.76	125,584,675.46	136,081,196.94
Utilidad en operación	Q	2,078,257.55	2,198,422.14	2,311,554.26	2,415,736.50	2,508,760.76	2,588,091.11	2,609,309.87	2,610,608.49	2,588,198.51	2,710,734.57
Gastos											
Sueldos vendedores	Q	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Comisiones vendedores	Q	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ISR del terreno industrial	Q	29,446.20	30,918.51	32,464.44	34,087.66	35,792.04	37,581.64	39,460.72	41,433.76	43,505.45	45,680.72
Gastos administrativos	Q	100,000.00	102,000.00	104,040.00	106,120.80	108,243.22	110,408.08	112,616.24	114,868.57	117,165.94	119,509.26
Gasto total	Q	129,446.20	132,918.51	136,504.44	140,208.46	144,035.26	147,989.72	152,076.97	156,302.33	160,671.39	165,189.98
Utilidad antes de impuesto	Q	1,948,811.35	2,065,503.63	2,175,049.82	2,275,528.04	2,364,725.51	2,440,101.38	2,457,232.91	2,454,306.16	2,427,527.13	2,545,544.59
(-) ISR (25%)	Q	487,202.84	516,375.91	543,762.46	568,882.01	591,181.38	610,025.35	614,308.23	613,576.54	606,881.78	636,386.15
(=) Utilidad neta	Q	1,461,608.51	1,549,127.72	1,631,287.37	1,706,646.03	1,773,544.13	1,830,076.04	1,842,924.68	1,840,729.62	1,820,645.34	1,909,158.44
IVA											
IVA débito (al cliente)	Q	8,217,981.86	8,887,747.38	9,612,098.79	10,395,484.84	11,242,716.86	12,158,998.28	13,149,956.64	14,221,678.11	15,380,744.88	16,634,275.58
IVA crédito (de proveedores)	Q	7,310,284.76	7,911,215.82	8,561,637.04	9,265,633.31	10,027,627.56	10,852,408.86	11,745,162.80	12,711,504.44	13,757,514.02	14,889,775.57
IVA a pagar	Q	907,697.10	976,531.56	1,050,461.75	1,129,851.53	1,215,089.30	1,306,589.42	1,404,793.85	1,510,173.67	1,623,230.86	1,744,500.01

Nota. Elaboración propia. La inversión inicial se obtuvo de la suma del costo de los equipos, instalación, tuberías, electricidad, instrumentación, excavación y preparación del sitio, contingencias e ingeniería. Los Ingresos Totales se obtuvieron del cálculo de las ventas y el precio con un incremento anual geométrico de 3% y 5%, respectivamente. Los Egresos Totales se calcularon en base a los costos totales directos e indirectos de producción. Los impuestos se calcularon bajo el régimen ISR 25% y el IVA a pagar. El IVA a pagar corresponde al Impuesto al Valor Agregado a pagar. Se determinó el precio de venta de ambos productos por medio de evaluación

comparativa como se muestra en la sección de datos calculados. Además, las unidades vendidas de cada producto se asumieron ser las unidades obtenidas por medio del balance de masa que se presenta en la sección de resultados. Se asumió un incremento anual geométrico del 10% para servicios. También se asumió incremento anual geométrico de 10% para mano de obra. Además, un incremento anual geométrico para el costo de la materia prima del 5%. De igual manera se asumió un incremento anual geométrico del 2% para los gastos administrativos y un incremento anual geométrico del 5% para el IUSI.

Figura 14. Flujo de caja del proyecto

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Inversión inicial	-Q 1,729,683.15										
Ingresos totales		Q 68,483,182.17	Q 74,064,561.51	Q 80,100,823.27	Q 86,629,040.37	Q 93,689,307.16	Q 101,324,985.70	Q 109,582,972.03	Q 118,513,984.25	Q 128,172,873.97	Q 138,791,931.51
Egresos totales		Q 66,076,284.82	Q 71,537,499.58	Q 77,460,629.22	Q 83,884,664.07	Q 90,851,906.60	Q 98,408,254.79	Q 106,645,022.36	Q 115,574,735.97	Q 125,256,035.66	Q 135,752,557.15
Impuestos		Q 1,394,899.94	Q 1,492,907.47	Q 1,594,224.21	Q 1,698,733.54	Q 1,806,270.67	Q 1,916,614.77	Q 2,019,102.07	Q 2,123,750.21	Q 2,230,112.64	Q 2,380,886.16
Abono a capital		Q 345,936.63	Q 345,936.63	Q 345,936.63	Q 345,936.63	Q 345,936.63					
Flujo de Efectivo Neto	-Q 1,729,683.15	Q 666,060.78	Q 688,217.84	Q 700,033.22	Q 699,706.13	Q 685,193.26	Q 1,000,116.13	Q 918,847.60	Q 815,498.08	Q 686,725.67	Q 658,488.20

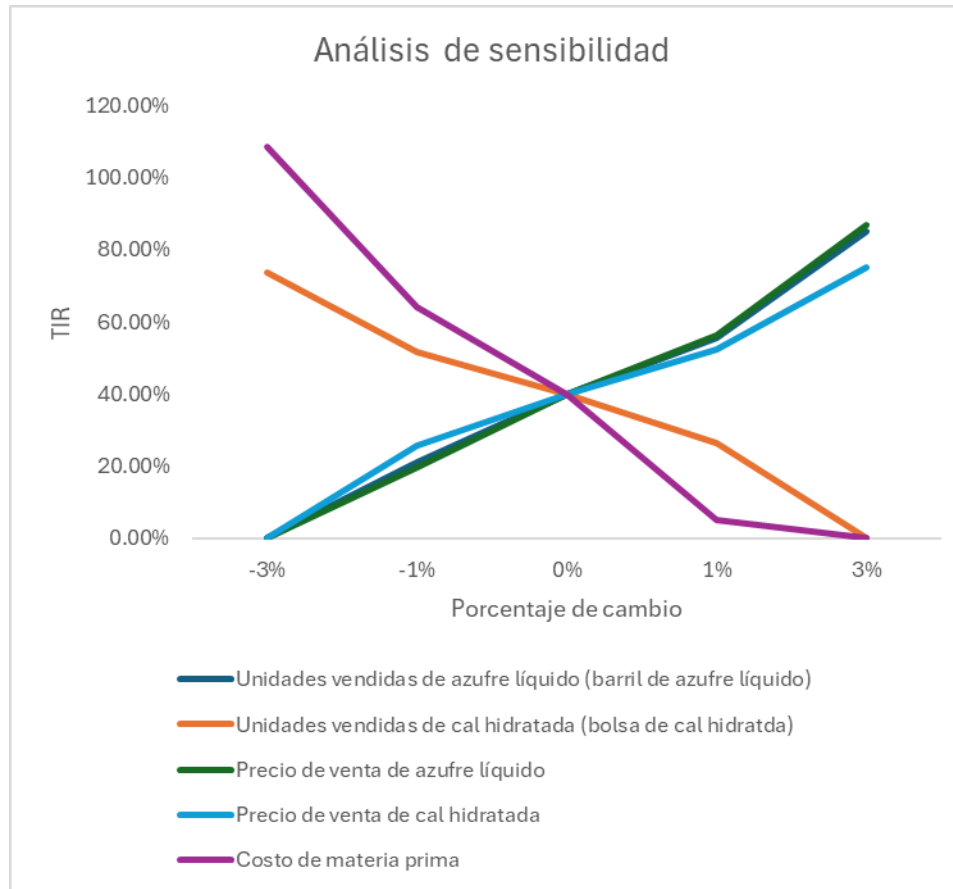
Nota. Elaboración propia. La inversión inicial se obtuvo de la suma del costo de los equipos, instalación, tuberías, electricidad, instrumentación, excavación y preparación del sitio, contingencias e ingeniería. Ingresos Totales se obtuvieron como se indica en el estado de resultados. Los Egresos Totales se calcularon en base a los costos totales directos e indirectos de producción. Los impuestos se calcularon bajo el régimen ISR 25% y el IVA a pagar. El abono a capital se calculó como la anualidad en base al capital a solicitar a la Institución Bancaria por un período de 5 años y una tasa del 12%. El Flujo de Efectivo Neto corresponde a la suma y/o resta neta de la inversión inicial, ingresos totales, egresos totales, impuestos y abonos a capital.

Cuadro 23. Índices económicos del proyecto

Índice	Valor
Valor Actual Neto (VAN)	Q 1,697,775.52
Tasa Interna Retorno (TIR)	39.83%
Periodo de retorno de Inversión (PRI)	2.54 años
Tasa Mínima Atractiva de Retorno (TMAR)	17%

Nota. La TMAR corresponde a las siglas Tasa Mínima Aceptable de Rendimiento, esta se calculó como se muestra en el cálculo 15 de la sección de datos calculados. El Valor Actual Neto hace referencia a los flujos de caja al momento presente. Si el VAN es mayor o igual a 0, entonces se acepta el proyecto; sin embargo, si el VAN es menor a 0, entonces se rechaza el proyecto dado que no será rentable. La Tasa Interna de Retorno es la tasa de descuento que iguala el valor presente de los ingresos del proyecto con el valor presente de los egresos. En este caso, es mayor a la TMAR, por lo que se acepta el proyecto. El Período de Retorno de Inversión se calculó con la fórmula descrita en el cálculo 16. Para determinar el Valor Actual Neto (VAN) se empleó la función “VNA” del Software Excel 2021. Para la determinación de la Tasa Interna de Retorno (TIR) se empleó la función “TIR” del Software Excel 2021.

Gráfico 1. Análisis de sensibilidad para planta piloto de azufre y cal hidratada



Nota. Elaboración propia. El gráfico anterior presenta el análisis de sensibilidad respecto a las unidades vendidas de azufre líquido, cal hidratada, precios de venta y el costo de la materia prima. Se presentan los cambios en la Tasa Interna de Retorno (TIR), al variar 1% y 3% las variables indicadas anteriormente. Los resultados numéricos se encuentran en el cuadro 73.

VIII. ANÁLISIS DE RESULTADOS

El objetivo principal de este trabajo es proponer un diseño de una planta piloto para la producción de azufre elemental y cal hidratada. Para ello se identificó las distintas etapas y operaciones unitarias del proceso, de igual manera se realizó los balances de masa y energía del proceso con el fin de poder dimensionar los equipos y con ello seleccionar los más adecuados para la planta piloto. Finalmente se realizó un análisis económico a través del estado de resultados y flujo de caja, para evaluar la rentabilidad del proceso.

Como primero objetivo se deseaba identificar las etapas principales del proceso: se identificaron las siguientes: la reducción de yeso a sulfuro de calcio a través de una reducción carbotérmica (color verde), la hidratación del sulfuro de calcio para generar cal hidratada y sulfuro de hidrógeno (color morado) y la conversión de sulfuro de hidrógeno a través del proceso de Claus (color azul). Estas etapas se encuentran identificadas en el diagrama de bloques de la sección de resultados (figura 8), al igual que las operaciones unitarias principales para poder llevar a cabo este proceso, siendo las principales de trituración de materia prima, calcinación, hidratación y reacciones catalíticas de conversión.

Como segundo objetivo se buscaba realizar los balances de masa y energía del proceso tomando en cuenta como base de cálculo 100 toneladas de yeso dihidratado. Se tomó como la base de cálculo debido a petición de la empresa a la que se le realizó la propuesta de diseño, esto ya que buscaba una capacidad de producción de una planta mediana. Además, al ser un proceso con varias etapas de conversión de productos es probable que no sea rentable realizarlo a una escala más pequeña. Se dimensionó como una planta continua que trabaja las 24 horas al día por 340 días al año, para poder tomar en cuenta 25 días al año de mantenimiento de los equipos. Se optó por una planta continúa debido a que se tienen varios reactores a lo largo de todo el proceso, los cuales operan de manera continua. Con el balance de masa se logró determinar una producción anual de 18,698.11 toneladas de cal hidratada

y 24,278.19 toneladas de azufre elemental, lo cual genera 747,924 unidades de cal hidratado tomando en cuenta una presentación de 25 kg la bolsa.

Como tercer objetivo se deseaba dimensionar y seleccionar los equipos necesarios para la producción de azufre líquido y cal apagada. Primero se realizó el dimensionamiento del almacenamiento de la materia prima, la cual por motivos de economía se almacenaron en pilas sobre concreto y techadas. Esto con el fin de tener protección contra la humedad y un área ventilada para evitar la combustión espontánea del carbón. Además, por su estructura se facilita el transporte al almacenarse de esta manera, el área requerida para almacenar el yeso es de 300 m² y para el carbón vegetal de 10,000 m². Por lo tanto, se requiere de equipo como retro excavadoras y camiones de volteo para trasladar a la planta de producción la materia prima. Tanto la retro excavadora como los camiones de volteo dimensionados y seleccionados se encuentran en las fichas técnicas de la sección de anexos.

Para tener un mejor control del flujo que entra a la planta de producción se recomienda la instalación de básculas para camiones, para con ello medir que el peso trasladado por el camión sea el necesario para el proceso. Para asegurar el flujo adecuado de yeso dihidratado y carbón vegetal, se utilizó un alimentador de banda el cual adapta su velocidad para tener el flujo programado de sólidos. Se seleccionó este tipo de alimentador debido a su eficiencia en mover grandes cantidades de material siendo muy útil en industrias mineras o de metalurgia, al igual que su versatilidad en manejar materiales desde rocas grandes hasta polvos finos, por lo que es adecuada para la alimentación de tamaños irregulares que será de las rocas de yeso dihidratado y carbón vegetal. La ficha técnica del alimentador de banda X-001 se encuentra en la sección de fichas técnicas de anexos.

El tamaño de partícula tanto del yeso como el carbón es importante para obtener mejores rendimientos en la reacción de reducción carbotérmica de sulfato de calcio a sulfuro de calcio; al tenerse un tamaño de partícula de 380 µm de yeso la literatura menciona obtenerse un porcentaje de rendimiento del 80% comparado con 1% al tenerse un tamaño de 1250 µm (Nengovhela R. N., 2009). Por esta razón se seleccionó como equipo de reducción primaria una trituradora de mandíbula, ya que esta es recomendada para materiales duros como lo son rocas y minerales, además por su mecanismo de compresión puede manejar grandes piedras sin desgastarse rápidamente siendo esto una ventaja al compararse con trituradoras de impacto o rodillos, las cuales pueden sufrir

desgastes prematuros. La primera trituradora Z-001 fue dimensionada para reducir hasta 20 mm, para lo cual, al seleccionarse el equipo, se obtuvo una trituradora que requiere 15 kW de potencia. Si se observa la ficha técnica del molino de bolas Z-003, la alimentación debe de ser menor a 25 mm. La trituradora seleccionada tiene tamaños de salida de ente 20 mm y 50 mm, por lo que se añadió la trituradora Z-002, la cual es también de mandíbula y tiene tamaños de salida de entre 10-30 mm. Por lo tanto, para asegurar una alimentación segura al molino de bolas Z-003, se añadió una criba vibratoria de 1 piso con una malla de 25 mm, lo cual permite que las pérdidas por cribado no sean excesivas: 622.92kg/h de los 4,125.10 k/h de yeso dihidratado y 8,333.33 kg/h de carbón vegetal ingresados a la criba. Finalmente, como equipo de reducción, se seleccionó un molino de bolas con un circuito abierto que permite la reducción con un alto grado de finura. El equipo seleccionado tiene tamaños de descarga de 0.3-0.074 mm, lo cual concuerda con los 380 μm recomendados por la literatura. Además, ayuda en la homogenización de los materiales que será de utilidad en el proceso de reacción de calcinación posterior. En el balance de la Figura 8 se puede observar pérdidas de materia prima, calculadas tomando en cuenta las pérdidas por humedad y dispensabilidad que se dan en el proceso de trituración. Debido a la fricción puede que aumenten temporalmente las temperaturas hasta alrededor de 60°C y como se aprecia en la Figura 4, esto conlleva pérdidas de humedad del yeso dihidratado (0.005 kg/kg como se aprecia en los cuadros 25 y 26).

Para el proceso de reducción carbotérmica entre el yeso y carbón, para producir sulfuro de calcio, se sugiere realizarse a altas temperaturas especialmente a 1,100°C ya que se obtiene un rendimiento del 96% (Nengovhela R. N., 2009). Por esta razón, se seleccionó un horno rotativo como equipo para llevar a cabo esta reacción, ya que algunos de sus modelos pueden llegar hasta temperaturas de 1,700°C. Es probable que el proceso requiera altas temperaturas debido a la alta energía de activación que requiere la reacción de reducción de sulfato de calcio a sulfuro de calcio. El tiempo necesario para que la reacción se complete en un 93% es de 60 minutos. Para un grado de conversión de 1, se requiere de 150 minutos (Nengovhela R. N., 2009), por lo que se dimensionó el horno rotatorio tomando un tiempo de reacción de 2.5 horas. Las dimensiones principales obtenidas en el horno rotatorio fueron de 2.8 m de diámetro y 44.8 m de largo. Típicamente, la transferencia de calor de horno rotatorio ocurre a través de la radiación de la llama, por lo que, entre más

brillante sea la llama, más energía será reflejada en la superficie cilíndrica. Esta es la razón por la que no es recomendable el uso de gas natural, ya que genera llamas transparentes y aumenta los costos, por lo que se seleccionó el carbón antracita pulverizado como combustible. Además, no se utilizó el carbón vegetal como combustible ya que el carbón antracita tiene un poder calorífico mayor de 32.67 MJ/kg (Popescu, 2016).

La cantidad de carbón fue determinada en torno a una combinación del balance másico y energético, el cual se encuentra en el cálculo 11. Es importante controlar que la cantidad de aire sea adecuada para no exceder en la producción de CO a más de 2%, por lo que se desea una combustión eficiente y las partículas pequeñas de los sólidos ayudan a este propósito. El horno rotatorio genera gases agotados, los cuales se componen principalmente de CO₂ y exceso de aire, estos salen del horno a una temperatura de 925°C como se indica por el balance energético del cálculo 11 y la información proporcionada en *Individual Dating Design* (Popescu, 2016), y debido a sus altas temperaturas este calor puede ser aprovechado en el precalentamiento de los sólidos que ingresan, para lo cual se dimensionó un precalentador vertical, el cual fue de 5 m de diámetro y 4 m de alto, como se aprecia en su hoja de especificaciones en la sección de resultados.

El proceso de enfriamiento de CaS es muy importante ya que el sulfuro de calcio sale del horno rotatorio a una temperatura de 625°C, y si se le añade el agua de hidratación del próximo paso del proceso se evaporaría el agua en vez de reaccionar apropiadamente y obtener la cal hidratada deseada. Para ello se seleccionó un enfriador rotatorio que utiliza aire ambiente a 20°C y al salir del enfriador sale a 760°C y se utiliza como aire secundario para el horno rotatorio. Se logra enfriar a 30°C el sulfuro de calcio con este equipo y por ello se seleccionó un enfriador rotatorio de 2.8 m de diámetro y una longitud de 4.30 m, siendo el adecuado para el sulfuro de calcio que proviene de una alta temperatura, logrando un enfriamiento homogéneo, además se puede tener el tiempo de control de residencia para el enfriador.

El sulfuro de calcio debe volverse cal hidratada y sulfuro de hidrogeno, para ello se debe añadir agua al sulfuro de calcio y así obtener los productos deseados. Para lograr la reacción adecuadamente se recomienda agregar la cantidad estequiométrica de agua que sugiere la reacción, lo cual es el doble respecto a la cantidad de sulfuro de calcio, obtenido durante la calcinación (Nengovhela R. N., 2009). El tiempo seleccionado para el

dimensionamiento fue de 30 minutos, esto debido a que la concentración de sulfuro comienza a permanecer constante a partir de este tiempo, de igual manera la velocidad de giro del agitador se recomienda que sea alrededor de 500 rpm (Nengovhela R. N., 2009). Esto debido a que, para sistemas multifase, en este caso líquido-sólido una buena agitación ayuda a mejorar el contacto entre fases y por lo tanto la transferencia de masa, lo que genera mayor interacción entre las fases y esto promueve la difusión de moléculas y el contacto de los reactivos (McCabe et al., 2007). A partir de estos parámetros se dimensionó que se necesita un reactor de 4,061 L, y debido a su alta velocidad de giro del agitador se seleccionó un Impulsor A310, el cual es un impulsor de alta eficiencia, y que de esta manera la potencia requerida por el motor no fuera aún mayor. El resto de las dimensiones del reactor de hidratación (R-001) se encuentran en su ficha técnica.

Para lograr la separación del sulfuro de hidrogeno del slurry que se forma con la cal hidratada, se pueden usar diferentes métodos, pero un método que no implica añadir nuevas materias primas sería por medio de un reactor térmico en el que se confía en el calentamiento en un tiempo de 30 minutos a una temperatura de 60°C para lograr la remoción de sulfuro de hidrógeno, por medio de evaporación. Por ello se dimensionó al igual que un reactor CSTR para que el proceso fuera continuo y con ello se obtuvo un volumen necesario de 5,002 L, para lo cual sus dimensiones se encuentran en la ficha técnica del área de anexos.

Para obtenerse la cal hidratada como producto final primero se separó del slurry a través de una centrifuga decantadora, debido a su alta cantidad de sólidos y el tamaño de partícula de los sólidos el cual se esperaría que estuviera alrededor de 380 μm , la centrifuga que se obtuvo tiene las dimensiones de 6,502 mm de largo y 1,450 mm. Para que la cal hidratada cumpla con los estándares se espera que tenga tamaño de partículas de entre 10- 20 μm , por lo que se seleccionó un molino de alta presión que ayuda a cumplir estos estándares y de esta manera el producto queda listo para empaque.

Para la parte final se seleccionó el proceso Claus debido a que este logra tener recuperaciones de azufre alrededor del 96%. Además, se seleccionó el proceso modificado que incluye 3 reactores catalíticos debido a que se logra aumentar la recuperación del azufre a un 99.9%, lo cual también puede ayudar en etapas posteriores al control de SO_2 de los gases de escape lo cual puede ser importante para el cuidado del medio ambiente. El paso

térmico del proceso Claus se realiza en el horno de reacción y el producto principal es el SO_2 , que posteriormente se utilizará en las etapas catalíticas. Se seleccionó alúmina activada como catalizador, debido a que es un material relativamente económico comparado con otros catalizadores, teniendo una vida útil larga, por lo que al no requerir reemplazos frecuentes se reducen los costos de operación. El azufre líquido obtenido en el condensador está listo para su uso industrial y ya se considera un producto final. El azufre obtenido del proceso Claus es sólido a temperatura ambiente, por lo que se requiere almacenar a alrededor de 120°C y 155°C , para que este por encima de su punto de fusión de 115°C ; por lo que se dimensionó un tanque de almacenamiento de 769.29 m^3 que mantiene una temperatura interna de 124.4°C , con una energía de 60.3 kW . En las fichas técnicas se encuentran las dimensiones de los equipos principales del proceso como lo son los reactores catalíticos, condensadores, calentadores, horno de reacción y calentadores, en estas están sus medidas dimensionadas para el proceso.

Como cuarto objetivo se deseaba realizar un análisis económico para evaluar la rentabilidad de la planta piloto. Para realizar el cálculo de la inversión inicial se encontró los costos de cada equipo dimensionado y/o seleccionado, y esto se encuentra en el cuadro 57. Luego por medio de una estimación por factores y rubros de una planta basados en *Perry's Chemical Engineers Handbook* (Perry & Green, 1999) se terminó de calcular la inversión inicial de la planta la cual fue de Q3,459,366.29. De esta inversión se asumió que se contaba con el 50% del capital y el 50% restante se realizaría por medio de un financiamiento externo, y se realizaría abonos de capital a lo largo de 5 años. Se asumió un valor de salvamento del 5% de la inversión total de la planta y con ello se obtuvo un valor de depreciación de Q 328,639.80 anuales. Tanto el estado de resultados como el flujo de caja se realizaron para 10 años, por lo que se tomó un incremento en el precio de venta del 5% tanto para la cal hidratada como el azufre líquido, un incremento del 3% anual de ventas, un incremento del 5% de costos de materia prima y un incremento del 10% en mano de obra. Por lo tanto, se puede observar que aumentan tanto los ingresos por ventas conforme los años siendo en el año 1 de Q68,483,182.17 y en el año 10 de Q138,791,931.51. En los 10 años de predicción en el estado de resultados se puede observar que en todos los años se obtuvieron utilidades, siendo estas cercanas al millón y medio de quetzales cada año.

Entre los aspectos positivos del análisis económico se encuentra el flujo de caja, el cual los 10 años presentes tuvieron valores positivos y fueron aumentado de Q 666,217.84 el primer año a 668,725.67 en el año 9. Se obtuvo Valor Neto Actual (VNA) para el proyecto de Q1,697,775.52 y Tasa Interna de Retorno (TIR) de 39.83%, la cual es mayor a la Tasa Mínima Atractiva de Retorno (TMAR) de 17%, por lo tanto, el proyecto es rentable. Además, al comparar con una planta de producción de sulfatos se muestra que tiene un buen período de inversión al ser de 2.54 años al comparar con los 3.67 años del estudio *Evaluar la factibilidad económica de una planta multipropósito* (Leiva, 2022). Aunque si se toma en cuenta la inversión completa de Q3,459,366.29 y no solo el 50% del capital ya se tiene un período de recuperación de 5.67 años, el cual sigue siendo un buen tiempo de recuperación tomando en cuenta que se tienen flujos positivos y bastante estables en los años analizados.

En el gráfico 1 se puede apreciar la sensibilidad del proyecto al cambio en las unidades vendidas de azufre líquido y cal hidratada, el precio de venta de cada uno de los productos y el costo de materia prima. Lo que se puede observar es que el proyecto tiene una sensibilidad bastante alta, tolerando porcentajes de cambio pequeños. Esto es por la elevada dependencia a una variable, en este caso para el costo de materia prima, ya que como se puede observar en el estado de resultados representa la mayor cantidad de costos para la planta piloto; y su alto costo elevado en materia prima se debe al carbón, tanto vegetal como el carbón antracita. En el gráfico se puede observar que si se disminuyen los costos de materia prima se eleva la TIR confirmando lo anteriormente descrito. De igual manera se puede observar que al disminuir las unidades vendidas de cal hidratada aumenta la TIR, esto se debe a los elevados costos de materias primas, por lo que aumentar las ventas de cal hidratada no genera un impacto positivo, ya que aumenta los costos de materia prima sin generar mayores ingresos que cubran esos costos. Por lo tanto, se puede deducir del análisis de sensibilidad que las unidades de azufre debido a su precio de venta más elevado si vale la pena aumentar sus ventas, pero si se desea aumentar las ventas de cal hidratada se debe realizar en conjunto con el azufre líquido.

IX. CONCLUSIONES

1. Se identificaron las distintas etapas y operaciones unitarias del proceso de producción de cal hidratada y azufre elemental. Las principales etapas son la reducción de yeso a sulfuro de calcio a través de una reducción carbotérmica; la hidratación del sulfuro de calcio para generar cal hidratada y sulfuro de hidrógeno y la conversión de sulfuro de hidrógeno a través del proceso de Claus. Las operaciones unitarias identificadas a lo largo del proceso se colocaron en el diagrama de bloques de la sección de resultados.
2. Se elaboraron los balances de masa y energía para el proceso, con lo cual se obtuvo que, a partir de 100 toneladas de yeso dihidratado en 1 día, se generan 2,291.434 kg/h de cal hidratada y 2,975.268 kg/h de azufre elemental.
3. Se elaboraron fichas técnicas con las especificaciones de los equipos de la planta, en las cuales se encuentran las dimensiones necesarias.
4. Se determinó que el proceso es rentable, gracias a que la tasa interna de retorno (TIR) es de 39.83%, la cual es mayor a la tasa mínima atractiva de retorno (TMAR) de 17%, por lo que sí es conveniente invertir en una planta piloto.
5. Se determinó que el valor neto actual (VNA) para el proyecto es de Q1,697,775.52, por lo que se estima que la planta piloto es rentable en términos netos.

X. RECOMENDACIONES

- Elaborar y evaluar el diseño de recuperación de dióxido de carbono liberado durante el proceso de calcinación del sulfato de calcio dihidratado en el horno rotatorio, ya que puede ser vendido y aumentar los ingresos.
- Evaluar la instalación de una planta de tratamiento de agua, ya que se requiere como materia prima en la producción de cal hidrata y la generación de ácido sulfhídrico.
- Realizar y evaluar el diseño de la purificación de la cola de gases provenientes del proceso Claus, entre los cuales se encuentran: el proceso *Sulfreen*, *Amoco CBA*, *IFP Clauspol 1500*, *IFP Clauspol 150*, *Stauffer (Aquaclaus)*, *SFGD* para una mayor recuperación de azufre, y los procesos *Trencor M* y *SCOT*, para la recuperación de sulfuro de hidrógeno que no reaccionó (Sander et al., 1984).
- Obtener más cotizaciones y buscar distintos proveedores para un análisis económico más preciso.
- Realizar el costeo de tuberías de manera individual para comparar con la aproximación brindada por *Perry's Chemical Engineers' Handbook* y obtener datos más cercanos al costeo del equipo.

XI. REFERENCIAS

- Anaya-Durand, A., y Pedroza-Flores, H. (2008). *Escalamiento, el arte de la ingeniería química: Plantas piloto, el paso entre el huevo y la gallina*. <https://www.redalyc.org/pdf/482/48223105.pdf>
- Britannica. (2024). *Carbon*. <https://www.britannica.com/science/carbon-chemical-element>
- Bruker. (2024). *Analytical tools for exploration and production of limestone and gypsum*. <https://www.bruker.com/en/applications/minerals-mining-and-petrochemical/minerals-industrial-minerals-commodities/limestone-and-gypsum.html>
- Cañas, J. S. (2007). *Análisis de tamaño de partícula por tamizado en agregado fino y grueso y determinación de material más fino que el tamiz no. 200 en agregado mineral por lavado*. <https://www.uca.edu.sv/mecanica-estructural/materias/materialesCostruccion/guiasLab/ensayoAgregados/GRANULOMETRIA.pdf>
- Couper, J. R., Roy Penney, W., Fair, J., & Walas, S. (2012). *Chemical Process Equipment*. Oxford, UK: Elsevier Inc.
- Curruchich, S. (25 de 06 de 2021). *Diario de Centro América*. Celebran importancia de las mipymes en la economía y el empleo: <https://dca.gob.gt/noticias-guatemala-diario-centro-america/celebran-importancia-de-las-mipymes-en-la-economia-y-el-empleo/>
- de Beer, M., Maree, J., Liebenberg, L., & Doucet, F. (2014). Conversion of calcium sulphide to calcium carbonate during the process of recovery of elemental sulphur from gypsum waste. *EISEVIER*, 9.
- FAO. (1983). *Métodos simples para fabricar carbón vegetal*. <https://www.fao.org/4/X5328S/X5328S00.htm>
- Geology Science. (9 de septiembre de 2023). *Gypsum*. <https://geologyscience.com/minerals/gypsum>

- Henein, H. (1980). *Experimental Study of Transverse Bed Motion in Rotary Kilns*.
[https://www.ualberta.ca/en/dept/chemeng/personalweb/hhenein/Metall%20Trans%20B%2014B\(2\)%20\(1983\)%20pp](https://www.ualberta.ca/en/dept/chemeng/personalweb/hhenein/Metall%20Trans%20B%2014B(2)%20(1983)%20pp)
- Hindustan Alcox Limited. (octubre de 2017). *Gypsum Storage : Types, Safety Measures to avoid hazards*.
<https://hindustanalcoxlimited.wordpress.com/category/bulk-storage/gypsum-storage/#:~:text=Keep%20the%20gypsum%20in%20the,increase%20in%20moisture%20and%20temperature.>
- Incitec Pivot Fertilisers. (noviembre de 2021). *Gypsum*.
https://incitecpivotfertilisers.com.au/~/_media/Files/IPF/Documents/Agritopics/Gypsum.pdf
- Jacobs, M., Taylor, R., Conradie, F., & Van der Merwe, A. (2023). *Real-time gypsum quality estimation in an industrial calciner: A neural network-based approach*.
<https://www.saimm.co.za/Journal/v123n10p483.pdf>
- JEPCO. (2020). *Sulfur Recovery Unit (SRU) Storage Tank Replacement*.
<https://jobepc.com/projects/sulfur-recovery-unit-sru-storage-tank-replacement/>
- Leiva, R. F. (2022). *Evaluar la factibilidad económica de una planta multipropósito*.
<http://www.scielo.sld.cu/pdf/rtq/v42n3/2224-6185-rtq-42-03-474.pdf>
- McCabe, W., Smith, J., & Harriot, P. (2007). *Operaciones unitarias en ingeniería química*. Ciudad de México, México: McGraw-Hill Interamericana.
- Ministerio de Energía y Minas. (2021). *Listado de licencias mineas*.
<https://mem.gob.gt/wp-content/uploads/2021/02/Derechos-Mineros-Vigentes-EXPLOTACION-enero-2021.pdf>
- Muñoz, D. M., & Rosal Higueros, O. (2022). *Ministerio de energía y minas*.
<https://mem.gob.gt/wp-content/uploads/2023/07/ANUARIO-ESTADISTICO-MINERO-DGM-MEM-2022-1.pdf>
- Nengovhela, R. N. (2009). *The recovery of sulphur from waste gypsum*.
<https://repository.up.ac.za/handle/2263/24394>

- Nengovhela, R. N. (2009). *The recovery of sulphur from waste gypsum*.
<https://repository.up.ac.za/bitstream/handle/2263/24394/Complete.pdf?sequence=6&isAllowed=y>
- OEC. (2022). *Azufre sublimado o precipitado, azufre coloidal en Guatemala*.
<https://oec.world/es/profile/bilateral-product/sulphur-sublimed-or-precipitated-colloidal-sulphur/reporter/gtm>
- OEC. (2022). *Carbón vegetal (incluido carbón de corteza o frutos), sea o no aglomerado en Guatemala*.
<https://oec.world/es/profile/bilateral-product/wood-charcoal/reporter/gtm>
- OEC. (2022). *Yeso en Guatemala*.
<https://oec.world/es/profile/bilateral-product/gypsum/reporter/gtm>
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. (2000). *Métodos simples para fabricar carbón vegetal*.
<https://www.fao.org/4/X5328S/X5328S00.htm>
- Ozeta, P. M. (20 de febrero de 2021). *Carbón nativo, el combustible vegetal que salta del bosque a la parrilla*.
<https://www.prensalibre.com/economia/carbon-nativo-el-combustible-vegetal-que-salta-del-bosque-a-la-parrilla/>
- Parcerisa, J. C. (1997). *Extracción, explotación, minería y proceso de tratamiento del yeso*.
<https://digital.csic.es/bitstream/10261/50139/1/bsecv-25-05-2012.pdf>
- Perry, R. E., & Green, D. (1999). *Perry's Chemical Engineers Handbook*. McGraw-Hill Companies, inc.
- Popescu, A. (2016). *Individual Detail Design*.
https://www.researchgate.net/profile/Adina-Popescu-2/publication/316425798_Design_of_Rotary_Kiln_for_Cristobalite_Production/links/58fd0c514585152eded4734d/Design-of-Rotary-Kiln-for-Cristobalite-Production.pdf
- Rodas, H. (27 de mayo de 2012). *Carbón: entre el bien y el mal*.
http://www.infoiarna.org.gt/rediarna/Articulos_prensa_iarna/adjuntos/2012/carbon-entre-el-bien-y-el-mal.pdf

- S&P Global. (marzo de 2024). *Sulfur*.
<https://www.spglobal.com/commodityinsights/en/ci/products/sulfur-chemical-economics-handbook.html#:~:text=It%20is%20used%20principally%20as,%2C%20cosmetics%2C%20and%20pharmaceutical%20applications.>
- Sander, U., H. Fischer, U. Rothe, & R. Kola. (1984). *Sulphur, Sulphur Dioxide Sulphuric Acid*. The British Sulphur Corporation Ltd. .
- Schulze, D. (2021). *Silo Design for Flow*. Powders and Bulk Solids:
https://doi.org/10.1007/978-3-030-76720-4_10
- Secretaría de Minería Mexicana. (2017). *Perfil del mercado del yeso*.
https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/287809/Perfil_Yeso_2017.pdf
- Sidhu, I. (2010). *Formulas Kiln*. <https://es.slideshare.net/slideshow/formulas-kiln/4821014>
- Simpson, M. (14 de julio de 2023). *What is Gypsum in Construction?*
<https://www.highspeedtraining.co.uk/hub/what-is-gypsum-in-construction/>
- Stewart, K. (2023). *calcium hydroxide*. <https://www.britannica.com/science/calcium-hydroxide>
- Strydom, C., & Potgieter, J. (1999). *Dehydration behaviour of a natural gypsum and a phosphogypsum during milling*. <https://sci-hub.se/https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0040603199000830>
- U.S Energy Information and Administration. (octubre de 2024). *Coal explained*.
<https://www.eia.gov/energyexplained/coal/>
- Universidad de Málaga . (2022). *Yso*. <https://www.umadivulga.uma.es/museo-virtual/mineralogia/yeso/#:~:text=El%20yeso%20se%20genera%20por,y%20antes%20de%20las%20sales.>
- Vadillo, E., y Ochoa, R. (junio de 1990). *Control de calidad de cal hidrtada o hidroxido de calcio Ca (OH)2*.
<https://revistas.pucp.edu.pe/index.php/quimica/article/download/5678/5671/>

XII. ANEXOS

A. Datos originales

Cuadro 24. Composición química del sulfato de calcio dihidratado

Compuesto	Composición (% m/m)
SiO ₂	3.7
Al ₂ O ₃	0.3
Fe ₂ O ₃	0.2
Mn ₂ O ₃	<0.1
TiO ₂	0.1
CaO	31.0
MgO	1.0
P ₂ O ₅	<0.1
SO ₃	43.8
Cl	0.1
K ₂ O	0.1
Na ₂ O	0.1
SrO	0.2
H ₂ O	19.4
<i>Total CaSO₄</i>	<i>74.8</i>

Nota. Elaboración propia, basado en Strydom y Potgieter (1999).

Cuadro 25. Propiedades físicas del sulfato de calcio dihidratado

Características de sulfato de calcio dihidratado	
Dureza	2 Mohs
Gravedad específica	2.32
Diámetro	15-20 cm
Solubilidad	0.26 kg/ 100 L agua
Densidad de sólido	2.30 g/cm ³
Densidad de bulto	1.4 g/cm ³
Ángulo de reposo	45°
Ángulo de deslizamiento	47.5°
Calor específico (Cp)	1.09 kJ/kg°C

Nota. Elaboración propia basado en Secretaría de Minería Mexicana (2017).

Cuadro 26. Composición química en porcentaje másico del carbón vegetal

Composición de la muestra	Composición (% m/m)
Humedad	7.5
Cenizas	1.4
Materia volátil	16.9
Carbón	74.2

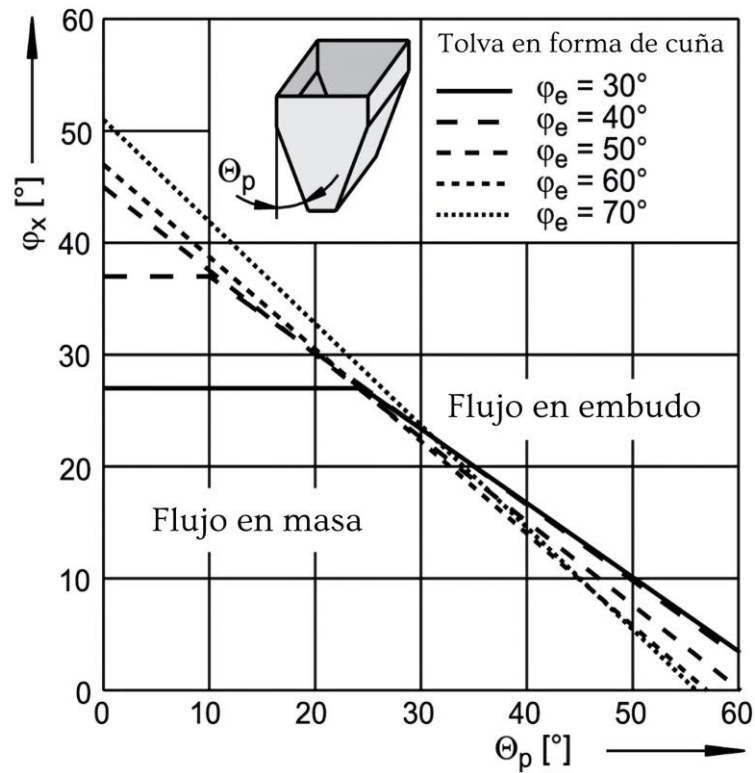
Elaboración propia basado en Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (2000).

Cuadro 27. Propiedades físicas del carbón vegetal

Características del carbón vegetal	
Diámetro	6 cm
Dureza	1.5 Mohs
Poder calorífico	32,410 kJ/kg
Densidad de Bulto	0.225 g/cm ³
Densidad carbón pulverizado	0.708 g/cm ³
Angulo de reposo	35°
Angulo de deslizamiento	36°
Calor específico (Cp)	0.34 kJ/kg°C

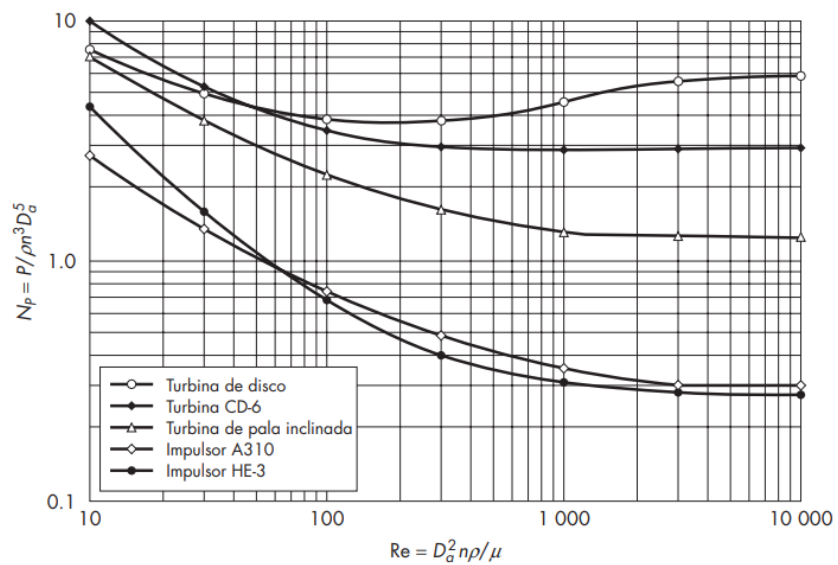
Elaboración propia basado en Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (2000).

Figura 15. Diseño de silo para flujo de sólidos



Nota. Adaptada de Schulze (2021).

Figura 16. Número de potencia N_p en función del número de Reynolds Re para turbinas e impulsores de alta eficiencia



(McCabe et al., 2007).

Figura 17. Índices de trabajo para trituración seca o molienda húmeda

Índices de trabajo para trituración seca[†] o molienda húmeda[‡]

Material	Gravedad específica	Índice de trabajo W_i
Bauxita	2.20	8.78
Residuo de cemento	3.15	13.45
Materias primas de cemento	2.67	10.51
Arcilla	2.51	6.30
Carbón	1.4	13.00
Coque	1.31	15.13
Granito	2.66	15.13
Grava	2.66	16.06
Roca de yeso	2.69	6.73
Mineral de hierro (hematita)	3.53	12.84
Piedra caliza	2.66	12.74
Roca fosfórica	2.74	9.92
Cuarzo	2.65	13.57
Esquisto	2.63	15.87
Pizarra	2.57	14.30
Roca volcánica	2.87	19.32

[†] Para molienda seca multiplicar por $\frac{4}{3}$.
[‡] Tomado con autorización de Allis-Chalmers, Solids Processing Equipment Div., Appleton, Wisconsin.

(McCabe et al., 2007).

Cuadro 28. Capacidad (ton/h) a (0.508 m/s; 1,601.85 kg/m³) y ángulo de inclinación indicado

Banda plana				
Ancho de banda (m)	5°	10°	20°	30°
0.3556	2.85	6.69	14.01	21.42
0.4064	3.87	9.18	19.05	29.16
0.4572	5.07	11.88	24.90	38.10
0.5080	6.39	15.06	31.50	48.24
0.6096	9.57	22.47	47.10	72.06
0.7620	13.51	36.45	76.32	116.8
0.9144	22.86	53.73	112.6	172.3
1.0668	31.65	74.37	155.9	238.5
1.2192	39.84	90.15	196.2	300.0
1.3716	53.49	125.7	263.4	403.2
1.5240	66.60	156.5	327.9	501.9
1.6764	81.12	190.5	399.6	611.1
1.8288	96.99	238.0	477.9	731.1

Nota. Elaboración propia basada en Couper et al. (2012).

B. Cálculos de muestra

Cálculo 1. Dimensionamiento de pila de almacenamiento de rocas de yeso dihidratado

Para el dimensionamiento de la pila de almacenamiento se consideró calcular su volumen asumiendo un prisma trapezoidal, una altura de la pila de 6 m, considerando la estabilidad del material y para garantizar la seguridad. Se tomo una densidad de bulto de 1.4 toneladas/ m³, un ángulo de reposo de 45° y se aproximó a 15 días de almacenamiento, por lo tanto, fueron 1500 toneladas de yeso.

Se calculó inicialmente el volumen del yeso dihidratado

$$\text{Volumen de yeso dihidratado} = \frac{\text{Masa (toneladas)}}{\text{Densidad } \left(\frac{\text{ton}}{\text{m}^3}\right)} = \frac{1,500 \text{ ton}}{1.4 \text{ ton/m}^3} = 1071.43 \text{ m}^3$$

Luego se procedió a calcular el volumen del prisma trapezoidal asumiendo distintas áreas para la base inferior y superior del prisma.

Ecuación 7. Volumen de prisma trapezoidal

$$V = \frac{h}{3} * (A_1 + A_2 + \sqrt{A_1 * A_2})$$

Dónde:

$V = \text{Volumen de pila}$

$h = \text{Altura de la pila}$

$A_1 = \text{Área de la base inferior (longitud inferior * ancho)}$

$A_2 = \text{Área de la base superior (longitud superior * ancho)}$

Base inferior:

$$A_1 = 30m * 10 m = 300 m^2$$

Base superior:

$$A_2 = 15m * 10 m = 150 m^2$$

Cálculo volumen:

$$V = \frac{6 m}{3} * \left(300 m^2 + 150 m^2 + \sqrt{300 m^2 * 150 m^2} \right) = 1,324.26 m^3$$

Cálculo 2. Dimensionamiento de pila de almacenamiento de carbón vegetal

Para el dimensionamiento de la pila de almacenamiento se consideró calcular su volumen asumiendo un cono truncado, una altura de la pila de 4 m, considerando la estabilidad del material y para garantizar la seguridad. Se tomo una densidad de bulto de 225 kg/m³, un ángulo de reposo de 35° y se aproximó a 15 días de almacenamiento, por lo tanto, fueron 3000 toneladas de carbón vegetal.

Se calculó inicialmente el volumen del carbón vegetal

$$\text{Volumen de carbón vegetal} = \frac{\text{Masa (toneladas)}}{\text{Densidad } \left(\frac{\text{ton}}{\text{m}^3} \right)} = \frac{3,000 \text{ ton}}{0.225 \text{ ton/m}^3} = 13,333.33 m^3$$

Luego se procedió a calcular el volumen del cono truncado asumiendo que la base menor r_2 es cero.

Ecuación 8. Volumen de cono truncado

$$V = \frac{1}{3} * \pi * h * (r_1^2 + r_1 * r_2 + r_2^2)$$

Dónde:

$V =$ Volumen de pila

$h =$ Altura de la pila

$r_1 =$ radio de la base mayor

$r_2 =$ radio de la base menor

Se encuentra el radio de la base asumiendo r_2 como 0

$$r = \sqrt{\frac{V * 3}{\pi * h}} = \sqrt{\frac{13,333.33 \text{ m}^3 * 3}{\pi * 4 \text{ m}}} = 56.42 \text{ m}$$

Por lo tanto, ya se tienen las dimensiones necesarias para la pila de cono del carbón vegetal

Cálculo 3. Dimensionamiento de camión de volteo para las rocas de yeso dihidratado y carbón vegetal

Para el dimensionamiento de un camión de volteo se tomó el volumen que ocupan los sólidos como el factor determinante para seleccionar el tamaño del camión de volteo deseado. Además, se asumió el flujo inicial de 4,166.67 kg/h de yeso dihidratado y 8,333.33 kg/h para el carbón vegetal, tomando como base los 100 t/ día de yeso dihidratado iniciales y se usó como base de cálculo 1 hora. Tomando en cuenta el uso de las densidades de bulto de ambos sólidos.

$$\text{Volumen de yeso dihidratado} = \frac{\text{Masa (kg)}}{\text{Densidad } (\frac{\text{kg}}{\text{m}^3})} = \frac{14,166.67 \frac{\text{kg}}{\text{h}} * 1 \text{ h}}{1,400 \text{ kg/m}^3} = 2.98 \text{ m}^3$$

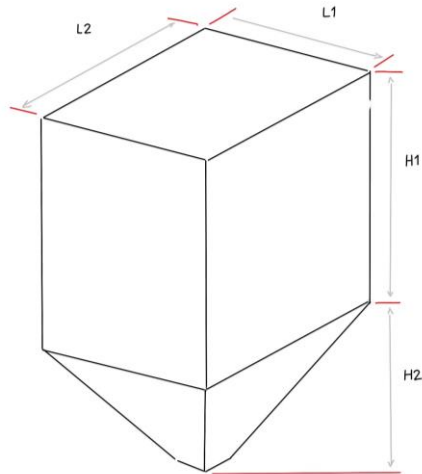
$$\text{Volumen de carbón vegetal} = \frac{\text{Masa (kg)}}{\text{Densidad } (\frac{\text{kg}}{\text{m}^3})} = \frac{8,333.33 \frac{\text{kg}}{\text{h}} * 1 \text{ h}}{225 \text{ kg/m}^3} = 37.04 \text{ m}^3$$

Cálculo 4. Dimensionamiento de tolva de alimentación en forma de cuña

En el dimensionamiento de una tolva al igual que para el dimensionamiento del camión de volteo es relevante el volumen. Por lo que para obtener el volumen total se calculó el volumen de cada sólido y se agregó un factor de seguridad del 50%. Lo que da un volumen total de 37.97 m³, pero para el dimensionamiento se utilizara un volumen más sencillo que es el siguiente,

$$\text{Volumen total} = 40.00 \text{ m}^3$$

Figura 18. Tolva trapezoidal de almacenamiento



Para obtener el volumen total se toman las medidas como

$$L2 = 8 \text{ m}$$

$$L1 = 4 \text{ m}$$

Luego a la Altura H1 se le coloca el factor de seguridad del 50%, asumiendo una altura inicial de 1.25 m

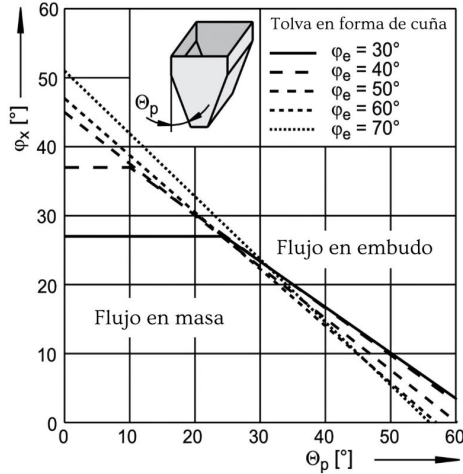
$$H1 = 1.25 \text{ m} * 1.5 = 1.875 \text{ m}$$

Para encontrar la altura H2 se encontró un ángulo respecto a la vertical de 15° , y con ello teniendo $L1 = 4 \text{ m}$, se realiza lo siguiente

$$H2 = \tan(15^\circ) * 4 \text{ m} = 1.071 \text{ m}$$

La salida se asume de $40 \text{ cm} * 40 \text{ cm}$ teniendo en cuenta el tamaño del sólido. Además, al revisar la figura # Diseño de silo para flujo de sólidos, al tener un ángulo de deslizamiento de 35° y ángulos de fricción en la pared de 40° se obtiene un ángulo respecto a la vertical de 15° , y de esta manera tener un flujo en masa para que pueda salir adecuadamente de la tolva.

Figura 19. Diseño de silo para flujo de sólidos



Nota. Adaptada de Schulze (2021).

Cálculo 5. Dimensionamiento de alimentador de banda

La velocidad de banda se supone conforme el tipo de material y condiciones de operación, por lo que, tomando en cuenta el yeso dihidrato y el carbón vegetal, se asume una velocidad de 1.5 m/s. Como se realiza una mezcla de sólidos, se debe calcular la densidad aparente, tomando en cuenta el flujo volumétrico antes calculado.

$$Densidad = \frac{12,500 \frac{kg}{h}}{40m^3/h} = 312.5 \text{ kg/m}^3$$

Luego, se puede calcular el área de la sección transversal del material transportado, tomando en cuenta la capacidad de transporte en kg/h, la velocidad de banda y la densidad del material, por medio de la siguiente ecuación

$$A = \frac{Q}{3600 * v * \rho}$$

$$A = \frac{12,500 \text{ kg/h}}{3600 * 1.5 \frac{m}{s} * 312.5 \frac{kg}{m^3}} = 0.0071m^2$$

El área se calculará como trapezoidal debido a que el material depositado sobre la banda no queda plano, sino que forma una pila debido al ángulo de reposo, que es la inclinación natural que el material adopta cuando está en reposo, por lo que se utiliza la fórmula de trapecio.

$$A = B * h + \frac{h^2}{\tan(35^\circ)}$$

Siendo que la altura se puede asumir como un ancho de banda, típicamente entre 10% y 20%, por lo que se puede asumir que $h=0.15*B$.

$$0.0071 \text{ m}^2 = B * (0.15 * B) + \frac{(0.15 * B)^2}{\tan(35^\circ)}$$

Para lo cual si se despeja la ecuación se obtiene el siguiente resultado.

$$B = 0.197 \text{ m}$$

Por lo tanto, tomando en cuenta el ancho de banda y su alimentación se puede seleccionar el equipo X-001.

Cálculo 6. Dimensionamiento para trituradoras

Para realizar el dimensionamiento de las trituradoras se utiliza la Ley de Bond para la potencia y utilizar la siguiente ecuación:

Ecuación 9. Potencia de reducción de tamaño

$$\frac{P}{\dot{m}} = 0.3162 W_i \left(\frac{1}{\sqrt{D_{pb}}} - \frac{1}{\sqrt{D_{pa}}} \right)$$

(McCabe et al., 2007).

D_{pa} = Tamaño de alimentación

D_{pb} = Tamaño de salda de producto

W_i = Índice de trabajo

Tomando 13 como índice de trabajo al ser índice de trabajo más grande de los dos sólidos que se deben triturar, esto se encuentra en la figura 17.

$$P = 12.5 \frac{t}{h} * \left(0.3162 * 13 * \left(\frac{1}{\sqrt{200 \text{ mm}}} - \frac{1}{\sqrt{20 \text{ mm}}} \right) \right) = 7.856 \text{ kW}$$

Para obtener la potencia requerida por el motor o la potencia útil se debe utilizar la siguiente ecuación

$$P_m = 2P_a$$

$$P_m = 2 * 7.856 \text{ kW} = 15.71 \text{ kW}$$

Para determinar el ancho de la boca de admisión se debe utilizar la siguiente ecuación tomando en cuenta el diámetro máximo del sólido a ingresar.

$$D_{m\acute{a}x} = 0.8 * A$$

$$A = \frac{200 \text{ mm}}{0.8} = 250 \text{ mm}$$

Y para el largo una regla general puede ser el 1.5 veces el ancho, por lo que da el siguiente resultado

$$L = 1.5 * 250 \text{ mm} = 375 \text{ mm}$$

Por lo tanto, con estos datos se seleccionó el equipo que mejor se adaptaba a las necesidades que se deben cumplir y esto se encuentra en la figura 21, de igual manera se realizó un cálculo similar para el equipo Z-002, el cual dio el resultado de: Potencia requerida por el motor: 17.93 kW, ancho de 62.50 mm y largo de 93.75 mm, encontrándose el equipo seleccionado en la figura 22.

Cálculo 7. Dimensionamiento de bandas transportadoras

Para el dimensionamiento de las bandas transportadoras se debe realizar el cálculo siguiente haciendo uso de las ecuaciones que se muestran a continuación.

$$Potencia_{sin \text{ carga}} = \frac{F(L + L_o)(0.06 * W * u)}{270}$$

$$Potencia \text{ con carga}_{Horizontal} = \frac{F(L + L_o)T}{270}$$

$$Potencia \text{ con carga}_{vertical} = \frac{T * h}{270}$$

Dónde la potencia queda en HP:

$F =$ Factor de fricción (normalmente 0.05)

$L =$ Distancia a transportar (m)

$W =$ Peso de las partes móviles $\left(\frac{kg}{m}\right)$ banda

$u =$ velocidad lineal $\left(\frac{m}{min}\right)$

$$T = \text{Capacidad de transporte} \left(\frac{\text{ton}}{\text{h}} \right)$$

$$h = \text{Altura (m)}$$

$$L_o = 30.15$$

Considerar un ancho de banda de 24 in o 609.6 mm se puede calcular la velocidad requerida, utilizando la figura 18, tomando en cuenta un ángulo 21.8° de la cual indica el siguiente cálculo,

$$u = 12.5 \frac{t}{h} * \frac{100}{72.06} = 17.3466 \frac{ft}{min} = 0.088 \frac{m}{s} = 5.285 \frac{m}{min}$$

Pero generalmente se recomienda velocidades de 0.5-1.5 m/s. Para terminar el cálculo se asume un peso de las partes móviles de 20 kg/m, un factor de fricción de 0.05, un largo de 5 m y un alto de 2 m. Al sustituir los valores en las ecuaciones anteriores se obtiene lo siguiente:

Horizontal:

$$Potencia_{\text{sin carga}} = 0.0412 \text{ HP}$$

$$Potencia \text{ con carga}_{\text{Horizontal}} = 0.0814 \text{ HP}$$

$$Total \text{ horizontal} = 0.1226 \text{ HP}$$

Vertical:

$$Potencia_{\text{sin carga}} = 0.0378 \text{ HP}$$

$$Potencia \text{ con carga}_{\text{Vertical}} = 0.0926 \text{ HP}$$

$$Total \text{ vertical} = 0.1304 \text{ HP}$$

Para encontrar la potencia total se debe tomar en cuenta el teorema de Pitágoras por lo que el cálculo se debe realizar como en los siguientes cálculos.

$$Total \text{ Potencia} = \sqrt{(0.1227 \text{ HP})^2 + (0.1304 \text{ HP})^2} = 0.1790 \text{ HP}$$

Por lo que a partir de esos datos se puede seleccionar la banda transportadora como la que se encuentra en la figura 41.

Cálculo 8. Dimensionamiento criba vibratoria

Tomando en cuenta una capacidad de 12.5 /h, con una densidad aparente de 312.5 kg/m³, una velocidad del material de 1 m/s y una eficiencia de cribado de 90% y un factor de ajuste de 1.

$$A = \frac{Q}{v * \rho_{ap} * \eta * F_{ajutes}}$$

$$A = \frac{12.5 \text{ t/h}}{1 \frac{m}{s} * 0.3125 \text{ t/m}^3 * 0.9 * 1} = 44.44 \text{ m}^2$$

La velocidad se puede calcular con la siguiente ecuación, tomando en cuenta una longitud de 10 m y 6°

$$v = L * \sin(\theta)$$

$$v = 10 \text{ m} * \sin(6^\circ) = 1.04 \text{ m/s}$$

Para realizar el cálculo de la potencia se utiliza la siguiente ecuación

$$P = \frac{C * L * g}{3,600 * \eta}$$

$$P = \text{Potencia (kW)}$$

$$C = \text{Capacidad } \left(\frac{t}{h}\right)$$

$$L = \text{Longitud criba (m)}$$

$$g = \text{la aceleración de la gravedad } \left(9.81 \frac{m}{s^2}\right)$$

$$\eta = \text{eficiencia motor}$$

Por lo que el cálculo daría,

$$P = \frac{12.5 \frac{t}{h} * 10 \text{ m} * 9.81 \text{ m/s}^2}{3,600 * 0.9} = 0.48 \text{ kW}$$

Por lo que se selecciona lo que aparece en la figura 24 como equipo que cumple con las características dimensionadas.

Cálculo 9. Dimensionamiento de un molino de bolas

Para dimensionar el molino de bolas se deben tener diferentes factores a consideración, como un factor de 1.3 por ser molienda en seco, un factor de 1.7 por ser un circuito abierto, teniendo en cuenta 12.5 t/h, para una alimentación del tamaño de 15,000 μ y obtener un

producto de 380 μm , 13 Kw-Hr/Ton como Índice de trabajo, una relación 1.25 Longitud/diámetro, volumen aparente 45% y una velocidad crítica de 70%, una eficiencia eléctrica 96%.

Para el factor de eficiencia por diámetro del molino al inicio se asume uno de 1, por que se asume que el diámetro estará cerca de 8 ft, pero al encontrar el verdadero diámetro se calcula de la siguiente manera:

$$F_3 = \left(\frac{8}{D}\right)^{0.2} = \left(\frac{8}{7.6}\right)^{0.2} = 1.01$$

Cuando la alimentación es gruesa o fina depende si el valor óptimo es $F_{80} \leq \text{Valor óptimo}$ es 1 y si es $F_{80} > \text{Valor óptimo}$.

$$F_4 = \frac{RR + (Wi - 7) * \left(\frac{F_{80} - F_o}{F_o}\right)}{RR}$$

Para lo que RR es la división del tamaño de la alimentación contra el tamaño del producto, y F_{80} es la alimentación en tamaño. Siendo F_o encontrado por medio de la siguiente ecuación.

$$F_o = 4000 * \sqrt{\frac{13}{Wi}} = 4,000$$

Por lo que F_4 queda de la siguiente manera

$$F_4 = \frac{39.47 + (13 - 7) * \left(\frac{15,000 - 4,000}{4,000}\right)}{39.47} = 1.418$$

Para determinar el siguiente factor si el producto $P_{80} \geq 75$ es un factor de 1 y si es $P_{80} < 75 \mu\text{m}$ se utiliza otra ecuación. De igual manera, el factor de reducción es 1 cuando $R_r \geq 6$ y tiene su propia ecuación $RR < 6$.

Con los distintos factores se debe corregir el W_i

$$W_i = Wi(\text{inicial}) * F_1 * F_2 * F_3 * F_4 * F_5 * F_6$$

$$W_i = 13 * 1.3 * 1.7 * 1.01 * 1.418 * 1 * 1 = 41.1465$$

Para determinar el consumo de energía específico se utiliza la siguiente ecuación

$$C_{ee} \left(\frac{\text{Kw} - \text{Hr}}{\text{Ton}}\right) = Wi(\text{Corre.}) * \left(\left(\frac{10}{\sqrt{P_{80}}}\right) - \left(\frac{10}{\sqrt{F_{80}}}\right)\right)$$

$$C_{ee} = 17.7481 \text{ Kw} - \text{Hr/Ton}$$

$$PM(Kw) = Cee * Toneladas a tratar$$

$$PM(Hp) = 1.341 * PM(Kw)$$

$$PM(Kw) = 221.852 Kw$$

$$PM(HP) = 297.503 HP$$

Para luego encontrar la potencia eléctrica a través de

$$PE(Kw) = PM(Hp) * \left(\frac{100}{Eff(\%)}\right)$$

$$PE(Kw) = 297.503 HP * \frac{100}{0.9} = 309.899$$

Para luego encontrar el diámetro en pies por medio de

$$D(Ft) = \left(\left(\frac{PE(Hp)}{Kb * (\%Jc^{0.461}) * (\%Vc^{1.505}) * \left(\frac{L}{D}\right)} \right) \right)^{\frac{1}{3.5}}$$

$$D(Ft) = 7.78 Ft$$

$$L = 1.25 * 7.78 = 9.73 Ft$$

Por lo que con los datos encontrados se encontró y seleccionó el equipo indicado en la ficha técnica de la figura 25.

Cálculo 10. Dimensionamiento precalentador para horno rotatorio

Para realizar el dimensionamiento del precalentador se requiere el flujo volumétrico de la mezcla de yeso y carbono, por lo tanto, haciendo uso de las densidades de bulto de cada uno de los sólidos y su flujo másico se determinó un flujo volumétrico total de 37.97 m³/h. Para dimensionar un precalentador de flujo continuo se asume un tiempo de residencia aproximado de 10 segundos, por lo que se toma la velocidad de caída como 0.5 m/s.

Por lo que la altura estimada será de:

$$Altura = velocidad de caída * tiempo de residencia$$

$$Altura = 0.5 \frac{m}{s} * 10 s = 5 m$$

Luego se requiere el área transversal del precalentador para lo cual se dividirá el flujo volumétrico dentro de la velocidad de caída del material.

$$\text{Área transversal} = \frac{\frac{37.97 \frac{m^3}{h}}{3600 \frac{s}{h}}}{0.5 \text{ m/s}} = 0.02109 \text{ m}^2$$

Luego se debe obtener el diámetro del precalentador para lo cual se asume una sección transversal de transferencia de calor del área de un círculo, por lo tanto, se obtiene la siguiente ecuación:

$$D = 2 * \sqrt{A/\pi}$$

D es el diámetro y A el área transversal, por lo que se sustituye el área transversal para obtener el diámetro mínimo que se requiere para el precalentador sólo tomando en cuenta los sólidos de ingreso.

$$D = 2 * \sqrt{\frac{0.02109 \text{ m}^2}{\pi}} = 0.1639 \text{ m}$$

Este es el diámetro mínimo, pero generalmente por temas de seguridad se requiere por lo menos 1 m de diámetro.

Para el balance de energía se puede tomar la ecuación de calor sensible, y aplicarla para ambos sólidos tomando en cuenta sus propios calores específicos. Esto se muestra en el cuadro 52 en la sección de datos calculados.

Ecuación 10. Calor sensible

$$Q = \dot{m} * C_p * (T_{salida} - T_{entrada})$$

$$Q = \text{Calor sensible} \left(\frac{kJ}{h} \right)$$

$$\dot{m} = \text{flujo de masa de} \left(\frac{kg}{h} \right)$$

$$c_p = \text{calor específico} \left(\frac{kJ}{kg} \text{ } ^\circ\text{C} \right)$$

$$T_{entrada} = \text{Temperatura de entrada} \text{ (} ^\circ\text{C)} \text{)}$$

$$T_{salida} = \text{Temperatura de salida} \text{ (} ^\circ\text{C)} \text{)}$$

El resultado que se obtiene es,

$$Q = 6,560,052.32 \text{ kJ/h}$$

Al tomar en cuenta una eficiencia del equipo del 85% se obtiene el siguiente resultado

$$Q = \frac{6,560,052.32 \text{ kJ/h}}{0.85} = 7,717,708.61 \text{ kJ/h}$$

Cálculo 11. Dimensionamiento horno rotatorio

La ecuación para un horno rotatorio que toma en cuenta la inclinación, rotación por minuto, el ángulo de reposo de las partículas, el largo y el diámetro es la siguiente ecuación:

Ecuación 11. Diseño del horno rotatorio

$$\tau = \frac{1.77\varphi^{1/2}L}{\alpha DN_m}$$

τ = Tiempo de residencia (h)

φ = ángulo de reposo para las partículas del horno (%)

L = largo del horno (m)

α = inclinación del horno (%)

D = Diámetro efectivo (m)

N_m = Número de rotaciones por minuto (rpm)

(Sidhu, 2010)

Para realizar el cálculo se tomará 36° como ángulo de reposo del material lo que equivale al 40% al medirse adecuadamente. Para este cálculo el ángulo de inclinación del horno es de 1° , lo que equipara a un 5%, esto debido a que según Sidhu un horno con un diámetro menor o igual a 2.8 m debe tener un 5% inclinación (Sidhu, 2010). Además, según Nengovhela sólo se requiere un tiempo de 60 minutos para completar la reacción a un 93%, por lo que una estimación de un tiempo de residencia de 2.5 horas es adecuada. (Nengovhela R. N., 2009). Por lo que la ecuación de diseño se convierte en:

$$2.5 = 2.24 * \frac{L}{D} * \frac{1}{N_m}$$

Como se explicó en el marco teórico el número de rotaciones debe ser basado en el flujo transversal del horno rotatorio. Por lo que se puede determinar por medio del número Froude con los límites de Rodamiento (*Rolling*) y tomando en cuenta 10% de llenado se asume

$$Fr = 0.32$$

Además, asumiendo que 1 rad^{-1} es igual a $60/2\pi$ se obtiene $\omega = 0.105 \text{ Nm.}$, además asumiendo $R=D/2$ Por lo que se obtiene:

$$Fr = \frac{\omega^2 R}{g} = 0.32$$

$$Fr = \frac{0.011 N_m^2 D}{2g} = 0.32$$

$$N_m^2 D = 575.44$$

$$N_m = 23.98 * D^{-\frac{1}{2}}$$

Esto puede ser sustituido en la ecuación de diseño para obtener,

$$2.5 = 2.24 * \frac{L}{D} * \frac{D^{1/2}}{23.98}$$

Por lo que se selecciona según Popescu el radio de $L/D = 16$ (Popescu, 2016), obteniéndose el siguiente resultado

$$2.5 = 2.24 * 16 * \frac{D^{1/2}}{23.98}$$

$$D^{\frac{1}{2}} = 1.67$$

Obteniéndose al final

$$D = 2.8 \text{ m}$$

$$L = 44.8 \text{ m}$$

$$N_m = 14.33 \text{ rpm}$$

Para realizar el balance de masa y determinar la energía requerida por el equipo, se asumió un estado estacionario. Los sólidos entran en el horno rotatorio a 975°C. El aire primario y el carbón antracita pulverizado entran a 60°C, para ser totalmente encendidos por el aire secundario que entra 760°C. Se toma en cuenta un exceso de aire del 5%. De igual manera se asume una combustión completa por lo que se libera 392 kJ/mol. La temperatura de salida de los gases agotados es de 975°C. La energía por pérdidas por humedad del carbón antracita son consideradas insignificantes. La temperatura interior del horno es de 1100°C; después del aislamiento, es de 350°C y la temperatura de la capa exterior del horno no debe exceder los 90°C. La temperatura del aire entra a 20° C a una velocidad de 3m/s. El aire primario representa el 25% del aire total y el aire secundario, el 75%. La temperatura de salida del sulfuro de calcio es de 625°C.

Entre los aspectos que pueden generar energía dentro del horno se encuentran: el calor de la materia prima, el calor sensible del carbón combustible y el aire y el calor de combustión de combustible.

Primero se calculó la energía de la materia prima al entrar en el horno rotatorio:

$$Q_{rm} = m_{sólidos} * C_{p(sólidos)} * T_{sólidos}$$

$$Q_{rm} = 1,880.09 \text{ kW}$$

El cálculo se encuentra en el Cuadro 54 de la sección de datos calculados. De manera similar se realizó el cálculo para el calor sensible del combustible, así como del aire primario y secundario.

$$Q_{sens} = m_{combustible} * C_{p(combustible)} * T_{combustible} + m_{aire1} * C_{p(aire)} * T_{aire1} + m_{aire2} * C_{p(aire)} * T_{aire2}$$

$$Q_{sens} = 1,263.78 \text{ kW}$$

La energía de generación se puede representar por la energía de combustión, para la cual se toma la siguiente ecuación como propuesta y se utiliza el calor de combustión de 392 MJ/kg propuesto.

$$Q_{combustión} = m_{combustible} * \Delta H_{combustión}$$

$$Q_{combustión} = 462.52 \frac{\text{kg}}{\text{h}} * 32.67 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} * \frac{1000 \text{ kJ}}{1 \text{ MJ}} * \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} = 4,197.34 \text{ kW}$$

Las salidas de calor siguientes fueron calculadas: calor de formación de sulfuro de calcio, las pérdidas, calor sensible del sulfuro de calcio, el calor de los gases de agotamiento la conducción, la radiación y la convección a lo largo de la superficie del horno.

A continuación, se muestra el calor de formación del sulfuro de calcio,

$$Q_{formación} = m_{sólidos} * C_{p(sólidos)} * T_{formación}$$

$$Q_{formación} = 3,026.13 \frac{kg}{h} * \frac{0.67 kJ}{kg °C} * 1,100°C = 2,230,260.46 kJ/h$$

$$Q_{formación} = 619.52 kW$$

Como se mencionó anteriormente el sulfuro de calcio sale del horno a la temperatura de 675°C, por lo que con esta temperatura se calcula la energía liberada.

$$Q_{liberado} = m_{sólidos} * C_{p(sólidos)} * T_{sólidos}$$

$$Q_{liberado} = 3,026.13 \frac{kg}{h} * \frac{0.67 kJ}{kg °C} * 625°C = 1,266,193.44 kJ/h$$

$$Q_{liberado} = 352.00 kW$$

Para el cálculo de los gases de combustión se tomó en cuenta los 975°C de la salida de los gases agotados. Se asumió un calor específico (cp) de 1.0 kJ/kg°C para los gases agotados, que en el balance de materia son señalados como otros. El cálculo detallado se encuentra en el cuadro # de la sección de datos calculados

$$Q_{gases agotados}$$

$$= m_{CO2} * c_{pCO2} * T_{CO2} + m_{H2O} * c_{pH2O} * T_{H2O} + m_{aire} * c_{p aire} * T_{aire}$$

$$+ m_{otros} * C_{p otros} * T_{otros}$$

$$Q_{gases agotados} = 4,533.22 kW$$

La conducción a través del horno depende de la conductividad del material de aislamiento y el acero inoxidable del caparazón, se puede calcular por medio de la siguiente ecuación.

Ecuación 12. Calor de conducción

$$Q_{conducción} = \frac{T_{in} - T_{superficie}}{\frac{s1}{k_1 A} + \frac{s2}{k_2 A}}$$

Para ello se obtuvo que $s1 = 20$ cm, $s2 = 3.5$, $k1 = 0.2$ W/m*K y $k2 = 19$ W/m*K y que A es el área calculada con la fórmula $D*L*\pi$, la temperatura de T_{in} es 1100°C y $T_{superficie}$ es 90°C .

$$Q_{conducción} = 397.29 \text{ kW}$$

El calor de radiación se calculó de la siguiente manera

Ecuación 13. Calor de radiación

$$Q_{rad} = A * \varepsilon * \sigma * (T_{superficie}^4 - T_{aire ambiente}^4)$$

Donde A es el área de radiación dada por la fórmula $D*L*\pi$, ε es la superficie de refracción, la cual es 0.78 para acero inoxidable, σ es la constante de Boltzmann de $5.67*10^{-8}$ Wm⁻² K⁻⁴, tomando en cuenta la temperatura del aire ambiente de 20°C y 90°C la superficie. El cálculo se encuentra en el cuadro # de datos calculados.

$$Q_{rad} = 174.40 \text{ kW}$$

Para determinar la energía de convección del horno rotatorio, se requiere realizar el cálculo del número de Reynolds y este fue calculado considerando el aire a condiciones de medio ambiente 20°C , una velocidad de 3 m/s, con una densidad de 1.2 kg/m³ a una viscosidad de $2*10^{-5}$ Pa*s con una conductividad de 0.024 Wm⁻¹*K⁻¹ y con un diámetro externo de 2.8 m más 0.2 m de aislamiento y 0.025 m del acero inoxidable.

Ecuación 14. Número de Reynolds

$$Re = \frac{\rho_{aire} * \overline{u_{aire}} * D_{afuera}}{\mu_{aire}}$$

$$Re = 546,300$$

Luego se debe calcular el número de Prandtl

Ecuación 15. Número de Prandtl

$$Pr = \frac{Cp_{aire} * \mu_{aire}}{k_{aire}}$$

$$Pr = 0.83$$

Finalmente se debe calcular el número de Nusselt usando el Dittus-Boelter para un fluido caliente de $n=0.4$

Ecuación 16. Número de Nusselt

$$Nu = 0.023Re^{\frac{4}{5}}Pr^{0.4}$$

$$Nu = 831.76$$

Por lo tanto, se despeja la altura siguiendo la siguiente ecuación

$$Nu = \frac{h * D_{out}}{k_{aire}}$$

Para obtener,

$$h = 6.58 \text{ m}$$

Luego se utiliza la ecuación de calor de convección para el calor de convección, donde el área se calcula como $D*L*\pi$.

Ecuación 17. Calor de convección

$$Q_{convección} = h * A * \Delta T$$

$$Q_{convección} = 181.44 \text{ kW}$$

El balance final tomando en cuenta pérdidas de 1,083 kW debería de quedar con la siguiente ecuación:

$$Q_{rm} + Q_{sens} + Q_{comb} = Q_{form} + Q_{lib} + Q_{gasag} + Q_{cond} + Q_{rad} + Q_{conv} + Q_{pérdidas}$$

$$Q_{ingreso} = Q_{salida} = Q_{requerido} = 7.34 \text{ MW}$$

Cálculo 12. Dimensionamiento de enfriador rotatorio

Para realizar el dimensionamiento se debe tomar el flujo de material el cual es sulfuro de calcio 3,026.13 kg/h y entra a una temperatura de 625°C, tiene una temperatura de salida de 30°C, teniendo en cuenta un Cp de 0.8 kJ/kg*K de sulfuro de calcio; y el aire tiene una temperatura inicial de 20°C y una temperatura de salida 760°C y capacidad calorífica de 1,005 kJ/kg*K

$$Q = m_{sólidos} * C_{p(sólidos)} * T_{sólidos}$$

Siendo la temperatura una resta entre 625°C-30°C, por lo que el resultado de la carga térmica necesaria es

$$Q = 400.12 \text{ kW}$$

Con este calor se puede determinar el mínimo aire necesario para enfriar el enfriador rotatorio. Para el cual se requiere utilizar la siguiente ecuación

$$Q = m_{aire} * C_{p(aire)} * T_{aire}$$

Teniendo el cambio de temperatura del aire de 760°C-20°C =740°C y el calor de 400.12 kW encontrado anteriormente.

$$m_{aire} = \frac{Q}{C_{p(aire)} * T_{aire}} = 0.538 \frac{\text{kg}}{\text{s}} = 1,936.85 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

Tomando en cuenta un largo de 4.30 m podemos y asumiendo una velocidad de 0.01 m/s

$$t = \frac{L}{v_{material}} = 430 \text{ s}$$

Cálculo 13. Dimensionamiento reactor CSTR

Para el dimensionamiento de un reactor de tanque agitado continuo se puede determinar el volumen del reactor haciendo uso de la siguiente ecuación:

$$V = v\tau$$

Para lo cual para el reactor de hidratación se tiene un tiempo de 0.5 horas y un flujo volumétrico de 6.768 m³/h y un factor de seguridad del 20%. lo que da

$$V = 0.5 \text{ h} * 6.768 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} * 1.2 = 4.06 \text{ m}^3 = 4,061 \text{ L}$$

$$\begin{aligned} \text{Diámetro del equipo} &= \sqrt[3]{\frac{4}{\pi} * \frac{v}{1.3}} \\ \text{Diámetro del equipo} &= 1.584 \text{ m} \end{aligned}$$

Para determinar la altura se obtiene

$$\begin{aligned} H &= 1.5 * D \\ H &= 1.5 * 1.584 \text{ m} = 2.376 \text{ m} \end{aligned}$$

Para determinar el diámetro del impulsor se utiliza la siguiente ecuación

$$Da = \frac{1}{3} * D$$

$$Da = \frac{1}{3} * 1.584 \text{ m} = 0.528 \text{ m}$$

Para encontrar el largo de la paleta se puede ocupar

$$\text{Largo paleta} = \frac{1}{4} * Da$$

$$\text{Largo paleta} = \frac{1}{4} * 0.528 \text{ m} = 0.132 \text{ m}$$

$$\text{Ancho de la placa deflectora} = \frac{1}{4} * Da$$

$$\text{Ancho de la placa deflectora} = \frac{1}{4} * 0.528 \text{ m} = 0.106 \text{ m}$$

Espacio entre palanca y tanque se puede tener,

$$\text{Espacio entre placa y tanque} = 0.02 * D = 0.02 * 1.54 \text{ m} = 0.0316 \text{ m}$$

$$\text{Distancia fondo a base del impulso} = \frac{1}{3} * D = \frac{1}{3} * 1.584 \text{ m} = 0.528 \text{ m}$$

$$\text{Diámetro disco} = Da - 2 * \text{Largo paleta}$$

$$\text{Diámetro disco} = 0.2640 \text{ m}$$

Teniendo en cuenta una velocidad de giro de 500 rpm y una densidad promedio de 1,274.48 kg/m³ se puede calcular la potencia necesaria para el agitador.

$$n = 500 \frac{1}{\text{min}} * \frac{1}{60 \text{ s}} = 8.333 \text{ s}^{-1}$$

$$N_{Re} = \frac{Da^2 * n * \rho}{\mu} = 2,960,000$$

Observando la figura 16 se obtiene un N_p de 0.3

$$P = \frac{N_p * n^3 * Da^5 \rho}{g_c} = 9,091.5258 \text{ W}$$

Se debe convertir a HP lo que da un total de 12.19 HP y tomando en cuenta una eficiencia del motor de 66% da que se requiere una potencia de 18.5 HP.

Estos cálculos fueron similares para los reactores restantes tanto el reactor térmico como el horno de reacción, y los catalíticos.

Cálculo 14. Dimensionar la Caldera de recuperación de calor

Para el dimensionamiento de la caldera de recuperación de calor se puede hacer uso de las siguientes ecuaciones

$$Q = mC_p * \Delta T$$

Teniendo un cambio de temperatura de 649°C a 25 °C

$$Q = 1.03 * 10^7 \text{ kJ/h}$$

$$At = \frac{Q}{(U_d * LMTD)}$$

Para lo cual se seleccionó un valor U de 140 W/m²*K y teniendo un T_{LMTD} de 649°C se obtiene la siguiente área.

$$At = 31.4 \text{ m}^2$$

Cálculos similares se realizaron para los condensadores y calentadores del sistema Claus.

Cálculo 15. TMAR

Para realizar el cálculo del período de retorno de inversión del flujo de caja se utilizó la siguiente ecuación

$$TMAR = \left[\left(\frac{E}{V} \right) * k_e \right] + \left[\left(\frac{D}{V} \right) * k_d * (1 - T) \right] + \text{Riesgo adicional}$$

Dónde,

$$\frac{E}{V} = \text{Proporción de capital propio}$$

$$\frac{D}{V} = \text{Proporción de deuda}$$

$$k_e = \text{Costo de capital propio}$$

$$T = \text{Tasa de impuestos corporativos}$$

Sustituyendo valores da lo siguiente,

$$TMAR = (0.5 * 0.12) + (0.5 * 0.12 * 1) + 0.05 = 0.17 = 17\%$$

Cálculo 16. Período de Retorno de Inversión

Para realizar el cálculo del período de retorno de inversión del flujo de caja se utilizó la siguiente ecuación

$$PRI = \text{Año antes de cubrir inversión} + \frac{(\text{Valor abs. Inversión} - V.A \text{ antes de cubrir inversión})}{(V.F \text{ cubre inversión})}$$

A continuación, con los valores requeridos se obtiene el período de retorno,

$$PRI = 2 \text{ años} + \frac{(Q 1,729,856.65 - Q 1,333,140.69)}{Q 700,033.22} = 2.54 \text{ años}$$

Cálculo 17. Cálculo IUSI

Primero se calcula el área del terreno

$$\text{Área} = 266 \text{ m} * 123 \text{ m} = 32,718 \text{ m}^2$$

Se asumió un valor de Q100 por metro cuadrado y una tasa de 0.9% anual por lo que el resultado es de:

$$32,718 \text{ m}^2 * Q 100 * 0.009 = Q 29,446.20$$

C. Datos calculados

Cuadro 29. Balance de masa para trituradora 1 del diagrama de bloques

Concepto	Flujo (kg/h)
Flujo de entrada de yeso dihidratado (CaSO ₄ *2H ₂ O)	4,166.67
x (kg CaSO ₄ / kg CaSO ₄ *2H ₂ O)	0.748
Flujo de entrada de carbón vegetal	8,333.33
y (kg carbón/ kg carbón con impurezas)	0.742
Flujo de salida de carbón vegetal	8,333.33
Pérdidas por dispersabilidad y pérdida de humedad (kg/kg)	0.005
Flujo de salida de yeso dihidratado (CaSO ₄ *2H ₂ O)	4,145.83
Pérdidas por dispersabilidad y pérdida de humedad	20.83
Entrada	12,500.00
Salida	12,500.00

Nota. Elaboración propia.

Cuadro 30. Balance de masa para trituradora 2 del diagrama de bloques

Concepto	Flujo (kg/h)
Flujo de entrada de yeso dihidratado (CaSO ₄ *2H ₂ O)	4,145.83
x (kg CaSO ₄ / kg CaSO ₄ *2H ₂ O)	0.748
Flujo de entrada de carbón vegetal	8,333.33
y (kg carbón/ kg carbón con impurezas)	0.742
Flujo de salida de carbón vegetal	8,333.33
Pérdidas por dispersabilidad y pérdida de humedad (kg/kg)	0.005
Flujo de salida de yeso dihidratado (CaSO ₄ *2H ₂ O)	4,125.10
Pérdidas por dispersabilidad y pérdida de humedad	20.73
Entrada	12,479.17
Salida	12,479.17

Nota. Elaboración propia.

Cuadro 31. Balance de masa criba vibratoria de diagrama de bloques

Concepto	Flujo (kg/h)
Flujo de entrada de yeso dihidratado (CaSO ₄ *2H ₂ O)	4,125.10
x (kg CaSO ₄ / kg CaSO ₄ *2H ₂ O)	0.748
Flujo de entrada de carbón vegetal	8,333.33
y (kg carbón/ kg carbón con impurezas)	0.742
Pérdidas por cribado (kg/kg)	0.1
Flujo de salida de yeso dihidratado (CaSO ₄ *2H ₂ O)	3,918.85
Flujo de salida de carbón vegetal	7,916.67
Pérdidas por cribado	622.92
Entrada	12,458.44
Salida	12,458.44

Nota. Elaboración propia.

Cuadro 32. Balance de masa molino de bolas de diagrama de bloques

Concepto	Flujo (kg/h)
Flujo de entrada de yeso dihidratado (CaSO ₄ *2H ₂ O)	3,918.85
x (kg CaSO ₄ / kg CaSO ₄ *2H ₂ O)	0.748
Flujo de entrada de carbón vegetal	7,916.67
y (kg carbón/ kg carbón con impurezas)	0.742
Flujo de salida de carbón vegetal	7,916.67
Pérdidas por dispersabilidad y pérdida de humedad (kg/kg)	0.005
Flujo de salida de yeso dihidratado (CaSO ₄ *2H ₂ O)	3,899.25
Pérdidas por dispersabilidad y pérdida de humedad	19.59
Entrada	11,835.52
Salida	11,835.52

Nota. Elaboración propia.

Cuadro 33. Balance de masa de precalentador vertical de diagrama bloques

Concepto	Flujo (kg/h)
Flujo de entrada de yeso dihidratado (CaSO ₄ *2H ₂ O)	3,899.25
Flujo de entrada de carbón vegetal	7,916.67
Flujo de salida de yeso anhidro y vapor de agua	3,899.25
Flujo de salida de carbón vegetal	7,916.67
Flujo de entrada de gases agotados	14,214.55
Flujo de salida gases agotados	14,214.55
Entrada	26,030.48
Salida	26,030.48

Nota. Elaboración propia.

Cuadro 34. Balance de masa de horno rotatorio del diagrama de bloques

Concepto	Flujo (kg/h)
Flujo de entrada de yeso dihidratado (CaSO ₄ *2H ₂ O)	3,899.25
Flujo de entrada de carbón vegetal	7,916.67
Flujo de entrada de carbón antracita pulverizado	462.52
Flujo de entrada aire	5,075.40
Flujo de salida de Sulfuro de Calcio (CaS)	3,026.13
Flujo de salida gases agotados	14,214.55
Flujo de salida de cenizas	113.15
Entrada	17,353.83
Salida	17,353.83

Nota. Elaboración propia.

Cuadro 35. Balance de masa de ciclón del diagrama de bloques

Concepto	Flujo (kg/h)
Flujo de entrada de gases agotados	14,214.55
Flujo de entrada de ceniza	113.15
Flujo de salida gases agotados	14,214.55
Flujo de salida de cenizas	113.15
Entrada	14,327.70
Salida	14,327.70

Nota. Elaboración propia.

Cuadro 36. Balance de masa de enfriador en diagrama de bloques

Concepto	Flujo (kg/h)
Flujo de entrada de Sulfuro de Calcio (CaS)	3,026.13
Flujo de salida de Sulfuro de Calcio (CaS)	3,026.13
Flujo de entrada aire frío	3,806.55
Flujo de salida aire caliente	3,806.55
Entrada	6,832.68
Salida	6,832.68

Nota. Elaboración propia.

Cuadro 37. Balance de masa de almacenamiento de diagrama de bloques

Concepto	Flujo (kg/h)
Flujo de entrada de Sulfuro de Calcio (CaS)	3,026.13
Flujo de salida de Sulfuro de Calcio (CaS)	3,026.13
Entrada	3,026.13
Salida	3,026.13

Nota. Elaboración propia.

Cuadro 38. Balance de masa de reactor de hidratación

Concepto	Flujo (kg/h)
Flujo de entrada de Sulfuro de Calcio (CaS)	3,026.13
Flujo de entrada de Agua	5,599.95
Flujo de salida <i>slurry</i> Ca(OH) ₂ , H ₂ S y agua	8,626.09
Entrada	8,626.09
Salida	8,626.09

Nota. Elaboración propia.

Cuadro 39. Balance de materia de reactor térmico de diagrama de bloques

Concepto	Flujo (kg/h)
Flujo de entrada <i>slurry</i> Ca(OH) ₂ , H ₂ S y agua	8,626.09
Flujo de salida Sulfuro de hidrogeno H ₂ S	3,174.28
Flujo de salida <i>slurry</i> Ca(OH) ₂ y agua	5,451.81
Entrada	8,626.09
Salida	8,626.09

Nota. Elaboración propia.

Cuadro 40. Balance de materia de centrifuga de diagrama de bloques

Concepto	Flujo (kg/h)
Flujo de entrada de <i>slurry</i> Ca(OH) ₂ y agua	5,451.81
Flujo de salida de Ca(OH) ₂	2,291.43
Flujo de salida de H ₂ O	3,160.37
Entrada	5,451.81
Salida	5,451.81

Nota. Elaboración propia.

Cuadro 41. Balance de materia de separador Whizzer de diagrama de bloques

Concepto	Flujo (kg/h)
Flujo de entrada Ca(OH) ₂	2,291.43
Flujo de salida Ca(OH) ₂ mayor a 20 μm	1,237.37
Flujo de salida Ca(OH) ₂ menor a 20 μm	1,054.06
Flujo de entrada de aire	18,360.00
Flujo de salida de aire	18,360.00
Entrada	20,651.43
Salida	20,651.43

Nota. Elaboración propia.

Cuadro 42. Balance de masa de molino de alta presión de diagrama de bloques

Concepto	Flujo (kg/h)
Flujo de entrada Ca(OH) ₂ mayor a 20 μm	1,237.37
Flujo de salida Ca(OH) ₂ menor a 20 μm	1,237.37
Entrada	1,237.37
Salida	1,237.37

Nota. Elaboración propia.

Cuadro 43. Balance de masa de almacenamiento de cal hidratada

Concepto	Flujo (kg/h)
Flujo de entrada de Ca(OH) ₂ terminado	2,291.43

Nota. Elaboración propia.

Cuadro 44. Balance de masa de reactor térmico de diagrama de bloques

Concepto	Flujo (kg/h)
Flujo de entrada de Sulfuro de hidrogeno H ₂ S	3,174.28
Flujo de entrada de aire	6,420.51
Flujo de salida de (H ₂ S, N ₂ , SO ₂ , H ₂ O y S ₈)	9,011.05
Flujo de pérdidas	583.75
Entrada	9,594.79
Salida	9,594.79

Nota. Elaboración propia.

Cuadro 45. Balance de masa de caldera de recuperación de calor de diagrama de bloques

Concepto	Flujo (kg/h)
Flujo de entrada de (H ₂ S, N ₂ , SO ₂ , H ₂ O y S ₈)	9,011.05
Flujo de salida de (H ₂ S, N ₂ , SO ₂ , H ₂ O y S ₈)	9,011.05
Entrada	9,011.05
Salida	9,011.05

Nota. Elaboración propia.

Cuadro 46. Balance de masa de condensador 1 de diagrama de bloques

Concepto	Flujo (kg/h)
Flujo de entrada de (H ₂ S, N ₂ , SO ₂ , H ₂ O y S ₈)	9,011.05
Flujo de salida de azufre líquido	894.89
Flujo de salida de (H ₂ S, N ₂ , SO ₂ , H ₂ O y S ₈)	8,116.16

Nota. Elaboración propia.

Cuadro 47. Balance de masa de calentador 1 de diagrama de calentador

Concepto	Flujo (kg/h)
Flujo de entrada de (H ₂ S, N ₂ , SO ₂ , H ₂ O y S ₈)	8,116.16
Flujo de salida de (H ₂ S, N ₂ , SO ₂ , H ₂ O y S ₈)	8,116.16
Entrada	8,116.16
Salida	8,116.16

Nota. Elaboración propia.

Cuadro 48. Balance de masa de reactor catalítico 1 de diagrama de bloques

Concepto	Flujo (kg/h)
Flujo de entrada de (H ₂ S, N ₂ , SO ₂ , H ₂ O y S ₈)	8,116.16
Flujo de salida de (H ₂ S, N ₂ , SO ₂ , H ₂ O y S ₈)	8,115.40
Flujo de pérdidas	0.76
Entrada	8,116.16
Salida	8,116.16

Nota. Elaboración propia.

Cuadro 49. Balance de masa de condensador 2 de diagrama de bloques

Concepto	Flujo (kg/h)
Flujo de entrada de (H ₂ S, N ₂ , SO ₂ , H ₂ O y S ₈)	8,115.40
Flujo de salida de azufre líquido	1,460.65
Flujo de salida de (H ₂ S, N ₂ , SO ₂ , H ₂ O y S ₈)	6,654.75
Entrada	8,115.40
Salida	8,115.40

Nota. Elaboración propia.

Cuadro 50. Balance de masa de calentador 2 de diagrama de bloques

Concepto	Flujo (kg/h)
Flujo de entrada de (H ₂ S, N ₂ , SO ₂ , H ₂ O y S ₈)	6,654.75
Flujo de salida de (H ₂ S, N ₂ , SO ₂ , H ₂ O y S ₈)	6,654.75
Entrada	6,654.75
Salida	6,654.75

Nota. Elaboración propia.

Cuadro 51. Balance de masa de reactor catalítico 2 de diagrama de bloques

Concepto	Flujo (kg/h)
Flujo de entrada de (H ₂ S, N ₂ , SO ₂ , H ₂ O y S ₈)	6,654.75
Flujo de salida de (H ₂ S, N ₂ , SO ₂ , H ₂ O y S ₈)	6,653.34
Flujo de pérdidas	1.42
Entrada	6,654.75
Salida	6,654.75

Nota. Elaboración propia.

Cuadro 52. Balance de masa de condensador 3 de diagrama de bloques

Concepto	Flujo (kg/h)
Flujo de entrada de (H ₂ S, N ₂ , SO ₂ , H ₂ O y S ₈)	6,653.34
Flujo de salida de azufre líquido	500.79
Flujo de salida de (H ₂ S, N ₂ , SO ₂ , H ₂ O y S ₈)	6,152.54
Entrada	6,653.34
Salida	6,653.34

Nota. Elaboración propia.

Cuadro 53. Balance de masa de calentador 3 de diagrama de bloques

Concepto	Flujo (kg/h)
Flujo de entrada de (H ₂ S, N ₂ , SO ₂ , H ₂ O y S ₈)	6,152.54
Flujo de salida de (H ₂ S, N ₂ , SO ₂ , H ₂ O y S ₈)	6,152.54
Entrada	6,152.54
Salida	6,152.54

Nota. Elaboración propia.

Cuadro 54. Balance de reactor catalítico 3 de diagrama de bloques

Concepto	Flujo (kg/h)
Flujo de entrada de (H ₂ S, N ₂ , SO ₂ , H ₂ O y S ₈)	6,152.54
Flujo de salida de (H ₂ S, N ₂ , SO ₂ , H ₂ O y S ₈)	6,152.05
Flujo de pérdidas	0.49
Entrada	6,152.54
Salida	6,152.54

Nota. Elaboración propia.

Cuadro 55. Balance de condensador 4 de diagrama de bloques

Concepto	Flujo (kg/h)
Flujo de entrada de (H ₂ S, N ₂ , SO ₂ , H ₂ O y S ₈)	6,152.05
Flujo de salida de azufre líquido	118.94
Flujo de salida de (H ₂ S, N ₂ , SO ₂ , H ₂ O y S ₈) a incinerar	6,033.12
Entrada	6,152.05
Salida	6,152.05

Nota. Elaboración propia.

Cuadro 56. Balance de almacenamiento de azufre líquido de diagrama de bloques

Concepto	Flujo (kg/h)
Azufre líquido	2,975.27

Nota. Elaboración propia.

Cuadro 57. Calor sensible para precalentador

	Yeso	Carbón vegetal
m (kg/h)	3,899.25	7,916.67
T salida (°C)	975.00	975.00
T entrada (°C)	30.00	30.00
Cp (kJ/kg°C)	1.09	0.34
Q (kJ/h)	4,016,427.32	2,543,625.00
Q total (kJ/h)		6,560,052.32

Cuadro 58. Energía proveniente de la materia prima que entra en el horno rotatorio

	Yeso	Carbón vegetal
m (kg/h)	3,899.25	7,916.67
T entrada (°C)	975.00	975.00
Cp (kJ/kg°C)	1.09	0.34
Q (kJ/h)	4,143,932.95	2,624,375.00
Q total (kJ/h)		6,768,307.95
Q total(kJ/s)		1,880.09

Cuadro 59. Calor sensible para el combustible (carbón antracita), aire primario y secundario

	Carbón antracita	Aire primario	Aire secundario
m (kg/h)	462.52	1,268.85	3,806.55
T entrada (K)	333.15	333.15	1,033.15
Cp (kJ/kg°K)	1.26	1.00	1.00
Q (kJ/h)	194,150.09	422,717.03	3,932,733.85
Q total (kJ/h)			4,549,600.97
Q total(kJ/s)			1,263.78

Cuadro 60. Energía de los gases agotados del horno rotatorio

	CO₂	H₂O	Aire	Otros
m (kg/h)	7,651.47	1,371.02	5,075.40	116.67
T salida (°C)	975.00	975.00	975.00	975.00
Cp (kJ/kg°C)	0.76	4.18	1.00	1.00
Q (kJ/h)	5,669,742.24	5,587,586.54	4,948,510.87	113,749.06
Q total (kJ/h)				16,319,588.70
Q total(kJ/s)				4,533.22

Cuadro 61. Costo total de la maquinaria y equipo para la inversión en la planta piloto

Maquinaria o mobiliario	Cantidad (Unidades)	Precio (Q)	Total	Método de Referencia
Retro excavadora	3	Q 62,400.00	Q 187,200.00	Estimación (Alibaba.com)
Camión de volteo 1	3	Q 90,480.00	Q 271,440.00	Estimación (Alibaba.com)
Camión de volteo 2	1	Q 77,220.00	Q 77,220.00	Estimación (Alibaba.com)
Balanza de transporte	1	Q 11,700.00	Q 11,700.00	Estimación (Alibaba.com)
Alimentador banda	1	Q 80,559.36	Q 80,559.36	Estimación (Alibaba.com)
Trituradora de mandíbula 1	1	Q 19,125.00	Q 19,125.00	Cotización
Trituradora de mandíbula 2	1	Q 38,500.00	Q 38,500.00	Estimación (made-in-china.com)
Criba vibratoria	1	Q 12,349.67	Q 12,349.67	Estimación (Alibaba.com)
Molino de bolas	1	Q 74,252.16	Q 74,252.16	Estimación (made-in-china.com)
Bandas transportadoras	7	Q 5,460.00	Q 38,220.00	Estimación (made-in-china.com)
Tolvas	2	Q 7,722.00	Q 15,444.00	Estimación (Alibaba.com)
Precalentador	1	Q 7,700.00	Q 7,700.00	Estimación (made-in-china.com)
Horno rotatorio	1	Q 162,240.00	Q 162,240.00	Estimación (made-in-china.com)

Maquinaria o mobiliario	Cantidad (Unidades)	Precio (Q)	Total	Método de Referencia
Enfriador rotatorio	1	Q 9,240.00	Q 9,240.00	Estimación (made-in-china.com)
Elevadores canjilones	2	Q 17,000.00	Q 34,000.00	Estimación (made-in-china.com)
Silo almacenamiento	1	Q 9,100.00	Q 9,100.00	Estimación (made-in-china.com)
Ciclón	1	Q 6,630.00	Q 6,630.00	Estimación (made-in-china.com)
Ventilador	5	Q 10,561.20	Q 52,806.00	Estimación (made-in-china.com)
Bombas	2	Q 6,949.00	Q 13,898.00	Estimación (made-in-china.com)
Reactor hidrólisis	1	Q 108,642.43	Q 108,642.43	Estimación (made-in-china.com)
Reactor térmico	1	Q 108,642.43	Q 108,642.43	Estimación (made-in-china.com)
Centrífuga	1	Q 236,442.24	Q 236,442.24	Estimación (made-in-china.com)
Separador de polvo	1	Q 24,000.00	Q 24,000.00	Estimación (made-in-china.com)
Condensadores	4	Q 23,000.00	Q 92,000.00	Estimación (made-in-china.com)
Calentador	3	Q 12,000.00	Q 36,000.00	Estimación (made-in-china.com)
Caldera de recuperación de calor	1	Q 43,000.00	Q 43,000.00	Estimación (made-in-china.com)
Reactores catalíticos	3	Q 209,000.00	Q 627,000.00	Estimación (made-in-china.com)
Tanques de almacenamiento	3	Q26,000.00	Q 78,000.00	Estimación (made-in-china.com)
TOTAL			Q2,514,726.29	

Nota. Elaboración propia.

Cuadro 62. Personal propuesto para operación de la planta piloto

Cantidad	Personal	Sueldo mensual	Total, mensual
Operarios	55	Q 3,600.00	Q 198,000.00
Gerente de producción	1	Q 15,000.00	Q 15,000.00
Asistente de producción	3	Q 10,000.00	Q 30,000.00
Gerente de control de calidad	1	Q 15,000.00	Q 15,000.00
Gerente de mantenimiento	1	Q 15,000.00	Q 15,000.00
Gerente de logística	1	Q 15,000.00	Q 15,000.00
		TOTAL	Q 288,000.00

Nota. Elaboración propia.

Cuadro 63. Prestaciones propuestas para pago de planillas

Rubro	Porcentaje
Bono 14	8.33%
Aguinaldo	8.33%
Indemnización	9.72%
Vacaciones	4.17%
IGGS	10.67%
IRTRA	1.00%
INTECAP	1.00%
TOTAL	43.22%

Nota. Elaboración propia.

Cuadro 64. Sueldos y prestaciones mensuales y anuales

Concepto	Cantidad
Total de sueldos mensuales	Q 288,000.00
Prestaciones mensuales	Q 124,473.60
Total de sueldos anuales	Q 3,456,000.00
Prestaciones anuales	Q 1,493,683.20
TOTAL (anual)	Q 4,949,683.20

Nota. Elaboración propia.

Cuadro 65. Costo unitario de materia prima

Costo unitario materia prima	Precio
Yeso dihidrato	Q 4.12
Carbón antracita	Q12.08
Carbón vegetal	Q 56.16
Sacos de papel	Q 3.53
TOTAL	Q 75.89

Nota. Elaboración propia.

Cuadro 66. Costo mensual por servicio básicos

Servicio	Precio	Período
Servicios básicos (agua y luz)	Q 193,050.00	Mensual
Servicios básicos (agua y luz)	Q 2,316,600.00	Anual

Nota. Elaboración propia.

Cuadro 67: Inversión total de la planta piloto

Rubro	Factor	Costo
Instalación	0.41	Q 118,080.00
Tuberías	0.34	Q 97,920.00
Electricidad	0.13	Q 37,440.00
Instrumentación	0.13	Q 37,440.00
Planta auxiliar energía	0.3	Q 86,400.00
Excavación y preparación del sitio	0.15	Q 43,200.00
Auxiliares	0.52	Q 149,760.00
Gasto de campo	0.39	Q 112,320.00
Ingeniería	0.39	Q 112,320.00
Contratistas	0.13	Q 37,440.00
Contingencia	0.39	Q 112,320.00
Costo equipos	N/A	Q 2,483,073.29
TOTAL		Q 3,427,713.29

Nota. Elaboración propia. Basado en Perry Chemical Engineering Handbook (1999).

Cuadro 68. Datos respecto a la inversión y financiamiento de la planta

Inversión y financiamiento	Cantidad
Inversión inicial	Q 3,459,366.29
Financiamiento externo	50.00%
Abonos a capital (años)	5.00
Interés	12.00%
Vida del equipo y proyecto (años)	10.00
Valor de salvamento	Q 172,968.31

Nota. Elaboración propia.

Cuadro 69. Cálculo de depreciación de la planta

Datos Depreciación	Cantidad
Valor inicial	Q3,459,366.29
Valor salvamento	Q 172,968.31
Tiempo (años)	10.00
Depreciación	Q 328,639.80

Nota. Elaboración propia. Se asumió una depreciación lineal

Cuadro 70. Cálculo de préstamo respecto a la inversión

Datos Préstamo	Cantidad
Inversión total	Q3,459,366.29
Inversión pagada	Q1,729,683.15
Capital financiado	Q1,729,683.15
Interés	12.00%
Período (años)	5.00
Anualidad	Q345,936.63

Nota. Elaboración propia.

Cuadro 71. Distribución de pagos de préstamo

Año	Saldo inicial	Abono a capital	Saldo final	Interés
0				
1	Q1,729,683.15	Q345,936.63	Q1,383,746.52	Q207,561.98
2	Q1,383,746.52	Q345,936.63	Q1,037,809.89	Q166,049.58
3	Q1,037,809.89	Q345,936.63	Q691,873.26	Q124,537.19
4	Q691,873.26	Q345,936.63	Q345,936.63	Q83,024.79
5	Q345,936.63	Q345,936.63	Q0.00	Q41,512.40

Nota. Elaboración propia.

Cuadro 72. Variación para calcular la sensibilidad

Variable	-3%	-1%	BASE	1%	3%
Unidades vendidas de azufre líquido (tonelada de azufre líquido)	23,550.00	24,036.00	24,278.19	24,521.00	25,007.00
Unidades vendidas de cal hidratada (bolsa de cal hidratada)	725,487.00	740,445.00	747,924	755,403.45	770,362.00
Precio de venta de azufre líquido	Q1,573.73	Q1,606.18	Q1,622.40	Q1,638.62	Q1,671.07
Precio de venta de cal hidratada	Q37.73	Q38.51	Q38.90	Q39.29	Q40.07
Costo de materia prima	Q73.61	Q75.13	Q75.89	Q76.65	Q78.17

Nota. Elaboración propia.

Cuadro 73. Efecto de la variación en la TIR

Variable	-3%	-1%	0%	1%	3%
Unidades vendidas de azufre líquido (barril de azufre líquido)	0.00%	20.95%	39.83%	55.76%	85.02%
Unidades vendidas de cal hidratada (bolsa de cal hidratada)	73.67%	51.71%	39.83%	26.44%	0.00%
Precio de venta de azufre líquido	0.00%	19.79%	39.83%	56.50%	87.08%
Precio de venta de cal hidratada	0.00%	25.68%	39.83%	52.30%	75.32%
Costo de materia prima	108.68%	64.17%	39.83%	5.20%	0.00%

Nota. Los valores de 0.00% en realidad indican un flujo negativo total para el proyecto. Elaboración propia.

Cuadro 74. Composición química del producto final cal hidratada

Compuesto	Flujo másico (kg/h)	Porcentaje (%) composición
H ₂ S	32.06	1.40%
SiO ₂	31.63	1.38%
Al ₂ O ₃	13.56	0.59%
Fe ₂ O ₃	6.78	0.30%
Mn ₂ O ₃	0.23	0.01%
TiO ₂	0.23	0.01%
MgO	36.15	1.58%
P ₂ O ₅	2.26	0.10%
Cl	17.40	0.76%
K ₂ O	2.26	0.10%

Compuesto	Flujo másico (kg/h)	Porcentaje (%) composición
Na ₂ O	0.00	0.00%
SrO	0.23	0.01%
CaO	1595.12	69.61%
H ₂ O	553.55	24.16%
Total	2291.43	100.00%

Nota. Elaboración propia.

Cuadro 75. Composición del flujo másico del proceso Claus de la figura 12

Flujos másicos	kmol/h	kg/h
Flujo 1		
H ₂ S	93.1420	3,174.2807
Flujo 2		
O ₂	46.5576	1,489.8429
N ₂	175.1452	4,906.4131
Total	221.7028	6,396.2560
Flujo 3		
H ₂ S	43.4955	1,482.3278
N ₂	175.1452	4,906.4131
SO ₂	21.7120	1,390.9980
H ₂ O	18.6230	335.5871
S ₈	3.4918	895.7215
Total	262.4676	9,011.0474
Flujo 4		
H ₂ S	43.4955	1,482.3278
N ₂	175.1452	4,906.4131
SO ₂	21.7120	1,390.9980
H ₂ O	18.6230	335.5871
S ₈	3.4918	895.7215
Total	262.4676	9,011.0474
Flujo 5		
S ₈	3.4883	894.8258
H ₂ O	0.0035	0.0629
Total	3.4918	894.8886
Flujo 6		
H ₂ S	43.4955	1,482.3278

Flujos másicos	kmol/h	kg/h
N ₂	175.1452	4,906.4131
SO ₂	21.7120	1,390.9980
H ₂ O	18.6195	335.5242
S ₈	0.0035	0.8957
Total	258.9757	8,116.1588
Flujo 7		
H ₂ S	43.4955	1,482.3278
N ₂	175.1452	4,906.4131
SO ₂	21.7120	1,390.9980
H ₂ O	18.6195	335.5242
S ₈	0.0035	0.8957
Total	258.9757	8,116.1588
Flujo 9		
H ₂ S	13.0988	446.4071
N ₂	175.1452	4,906.4131
SO ₂	6.5136	417.2994
H ₂ O	49.0163	883.2734
S ₈	5.6994	1,462.0069
Total	249.4733	8,115.3999
Flujo 10		
S ₈	5.6937	1,460.5449
H ₂ O	0.0057	0.1026
Total	5.6994	1,460.6475
Flujo 11		
H ₂ S	13.0988	446.4071
N ₂	175.1452	4,906.4131
SO ₂	6.5136	417.2994
H ₂ O	49.0106	883.1708
S ₈	0.0057	1.4620
Total	243.7739	6,654.7524
Flujo 12		
H ₂ S	13.0988	446.4071
N ₂	175.1452	4,906.4131
SO ₂	6.5136	417.2994

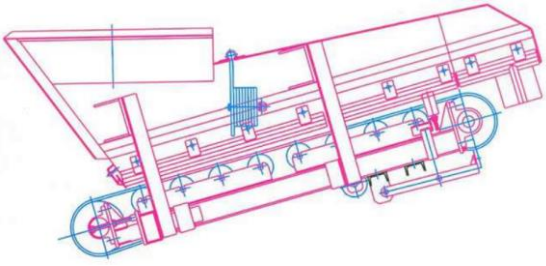
Flujos máscicos	kmol/h	kg/h
H ₂ O	49.0106	883.1708
S ₈	0.0057	1.4620
Total	243.7739	6,654.7524
Flujo 14		
H ₂ S	2.6771	91.2343
N ₂	175.1452	4,906.4131
SO ₂	1.3027	83.4599
H ₂ O	59.4323	1,070.9705
S ₈	1.9541	501.2595
Total	240.5114	6,653.3373
Flujo 15		
S ₈	1.9521	500.7583
H ₂ O	0.0020	0.0352
Total	1.9541	500.7934
Flujo 16		
H ₂ S	2.6771	91.2343
N ₂	175.1452	4,906.4131
SO ₂	1.3027	83.4599
H ₂ O	59.4304	1,070.9353
S ₈	0.0020	0.5013
Total	238.5573	6,152.5438
Flujo 17		
H ₂ S	2.6771	91.2343
N ₂	175.1452	4,906.4131
SO ₂	1.3027	83.4599
H ₂ O	59.4304	1,070.9353
S ₈	0.0020	0.5013
Total	238.5573	6,152.5438
Flujo 19		
H ₂ S	0.2019	6.8807
N ₂	175.1452	4,906.4131
SO ₂	0.0651	4.1730
H ₂ O	61.9055	1,115.5378
S ₈	0.4641	119.0491

Flujos másicos	kmol/h	kg/h
Total	237.7819	6,152.0537
Flujo 20		
S ₈	0.4636	118.9301
H ₂ O	0.0005	0.0084
Total	0.4641	118.9384
Flujo 21		
H ₂ S	0.2019	6.8807
N ₂	175.1452	4,906.4131
SO ₂	0.0651	4.1730
H ₂ O	61.9051	1,115.5294
S ₈	0.0005	0.1190
Total	237.3178	6,033.1153

Nota. El número de flujos es el mismo que el indicado en la figura 12. Elaboración propia.

D. Fichas técnicas

Figura 20. Hoja de especificación de alimentadores de banda

Aritécmi		Hoja de especificaciones de alimentadores de banda	
No. :	X-001	Hecho por :	Laura Pereira
Nombre :	Alimentador de banda	Revisado por :	
No. Documento :	W-P05	Aprobado por:	
Modelo:	AB-1500*650	Descripción:	Especificaciones técnicas para aliemtador de banda
Localización:			
Planta:	Producción de azufre elemental y cal hidratada		
ESPECIFICACIONES		DIAGRAMA DEL EQUIPO	
Flujos	Yeso dihidratado: 4166.67 kg/h		
	Carbón vegetal: 8333.33 kg/h		
Temperatura	Materia prima ingresa a 25°C		
Volumen	Yeso dihidratado: 2.98 m ³		
	Carbón vegetal: 37.04 m ³		
DATOS TÉCNICOS		CARACTERÍSTICAS	
Tambores mecanicados con conicidad.		Longitud	1.500 m
Rodillos amortiguadores en zona de carga, diámetro 0.133 m		Ancho de banda	0.650 m
Reductor de tipo tándem o coaxial sobredimensionado respecto a la potencia instalada		Potencia	2 kW
Rascador de cabeza.		Producción	40 m ³ /h
		Velocidad	1.5 m/s
		Ángulo	15°

Nota. Equipo seleccionado basado en el dimensionamiento del cálculo 5. Elaboración propia.

Figura 21. Hoja de especificaciones de trituradora de mandíbula Z-001

		Hoja de especificaciones de trituradora de mandíbula	
No. :	Z-001	Hecho por :	Laura Pereira
Nombre :	Trituradora de mandíbula	Revisado por :	
No. Documento :	W-P06	Aprobado por:	
Modelo:	PE250*400	Descripción:	Especificaciones técnicas para trituradora de mandíbula (trituración primaria)
Localización:			
Planta:	Producción de azufre elemental y cal hidratada		
ESPECIFICACIONES		DIAGRAMA DEL EQUIPO	
Flujos	Yeso dihidratado: 4166.67 kg/h		
	Cabón vegetal: 8333.33 kg/h		
Temperatura	Materia prima ingresa a 25°C		
Proceso	Trituración primaria		
DATOS TÉCNICOS		CARACTERÍSTICAS	
Engranaje	42QMo	Tamaño de ingreso	0.250*0.400 m
Eje principal	42QMo	Tamaño Max. Alimentación	0.200 m
Placas laterales	ZGMn13-4	Tamaño de salida	0.020-0.050 m
Resorte	50QV4(40*180*518)	Potencia del motor	15 kW
Clase de protección	IP55	Capacidad	5-20 t/h
Potencia nominal (kW)	0.55-315	Velocidad de eje	300 r/min
Clase de aislamiento	F	Peso (aprox.)	2.9 tn
Metodo de enfriamiento	IC411	Marca	Joyal
Altura sobre el nivel del mar	<1000	Rodamiento	ZWZ

Nota. Equipo seleccionado basado en el dimensionamiento del cálculo 6. Elaboración propia.

Figura 22. Hoja de especificaciones de trituradora de mandíbula Z-002

		Hoja de especificaciones de trituradora de mandíbula			
No. :	Z-002	Hecho por :	Laura Pereira		
Nombre :	Trituradora de mandíbula	Revisado por :			
No. Documento :	W-P07	Aprobado por:			
Modelo:	PEW180* 1300	Descripción:	Especificaciones técnicas para trituradora de mandíbula (trituration secundaria)		
Localización:					
Planta:	Producción de azufre elemental y cal hidratada				
ESPECIFICACIONES		DIAGRAMA DEL EQUIPO			
Flujos	Yeso dihidratado: 4145.83 kg/h				
	Cabón vegetal: 8333.3 kg/h				
Temperatura	Materia prima				
	ingresa a 25°C				
Proceso	Trituración				
	secundaria				
DATOS TÉCNICOS				CARACTERÍSTICAS	
Material principi del eje	40Cr			Tamaño de ingreso	0.180* 1.300 m
Método de conducción	Accionamiento eléctrico y diésel			Tamaño Max. Alimentación	0.150 m
Cuerpo de la mandíbula y material de la cabeza	Acero fundido			Tamaño de salida	0.010-0.030 m
		Potencia del motor	30-37 kW		
		Capacidad	12-35 t/h		
		Dimensiones totales	1.300* 2.150* 1.175 m		
		Peso (aprox.)	6 t		
		Marca	Shanghai Super		
		Velocidad de rotación	250r/min		

Nota. Equipo seleccionado basado en el dimensionamiento del cálculo 6. Elaboración propia.

Figura 24. Hoja de especificaciones de molino de bolas

		Hoja de especificaciones de molino de bolas			
No. :	Z-003	Hecho por :	Laura Pereira		
Nombre :	Molino de bolas	Revisado por :			
No. Documento :	W-P10	Aprobado por:			
Modelo:	M2236	Descripción:	Especificaciones técnicas para molino de bolas		
Localización:					
Planta:	Producción de azufre elemental y cal hidratada				
ESPECIFICACIONES		DIAGRAMA DEL EQUIPO			
Flujos	Yeso dihidratado: 3918.85 kg/h				
	Cabón vegetal: 7,916.67 kg/h				
Temperatura	Materia prima				
	Ingres a 35°C				
Proceso	Trituración				
	secundaria				
DATOS TÉCNICOS				CARACTERÍSTICAS	
Bolas	Cermámcas			Diámetro interior del cilindro	2.200 m
Continuo				Longitud	3.600 m
Materiales	Cemento, carbón yeso, minerales no metálicos, materiales de construcción.			Velocidad del cilindro	24.98 r/min
Diseño flexible en la descarga		Tamaño de alimentación	≤ 0.025 m		
Gran alimentación		Tamaño de descarga	0.3-0.074 mm		
		Capacidad	15.5-7 t/h		
		Potencia motor	245 kW		
		Dimensiones totales	9.127* 4.980* 3.794 m		
		Peso de referencia	48,000 kg		


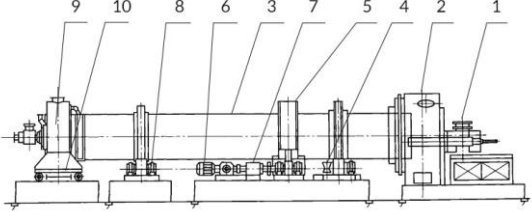
Nota. Equipo dimensionado y seleccionado conforme cálculo 9. Elaboración propia.

Figura 25. Hoja de especificaciones de precalentador

		Hoja de especificaciones de precalentador			
No. :	VV-001	Hecho por :	Laura Pereira		
Nombre :	Precalentador	Revisado por :			
No. Documento :	W-P11	Aprobado por :			
Modelo:	YRQ-06	Descripción:	Especificaciones técnicas para precalentador		
Localización:					
Planta:	Producción de azufre elemental y cal hidratada				
ESPECIFICACIONES		DIAGRAMA DEL EQUIPO			
Flujos	Yeso dihidratado: 3899.25 kg/h				
	Cabón vegetal: 7,916.67 kg/h				
Temperatura	Materia prima				
	ingresa a 35°C				
Proceso	Precalentamiento				
DATOS TÉCNICOS				CARACTERÍSTICAS	
Número de varillas de empuje	6.00			Tamaño de alimentación	0.1-0.5 mm
Altura del cuerpo	4 m			Capacidad	300 t/h
Materiales	Cemento, carbón yeso, minerales no metálicos, materiales de construcción.			Volumen total	40 m ³ /h
Diseño flexible en la descarga		Tamaño de alimentación	≤ 0.025 m		
Gran alimentación		Potencia	2144 kW		
		Diaméto	5 m		
		Peso de referencia	54978 kg		

Nota. Equipo seleccionado y dimensionado conforme cálculo 10. Elaboración propia.

Figura 26. Hoja de especificaciones de horno rotatorio

		Hoja de especificaciones de horno rotatorio			
No. :	D-001	Hecho por :	Laura Pereira		
Nombre :	Horno rotatorio	Revisado por :			
No. Documento :	W-P12	Aprobado por :			
Modelo:	ZSN4-225.21	Descripción:	Especificaciones técnicas para horno rotatorio		
Localización:					
Planta:	Producción de azufre elemental y cal hidratada				
ESPECIFICACIONES		DIAGRAMA DEL EQUIPO			
Flujos	Yeso dihidratado: 3899.25 kg/h				
	Cabón vegetal: 7,916.67 kg/h				
Temperatura	Materia prima				
	Ingres a 975°C				
Proceso	Calcínación				
DATOS TÉCNICOS				1	Área de ignición
Peso de equipo	201.58 kg			2	Sellado del horno
Alimentación	12.5-13.5 t/h			3	Coraza del horno
Porcentaje de inclinación	5%			4	Dispositivo de soporte
Número de dispositivos de soporte	4	5	Engranaje de circunferencia		
Rodillo de empuje	Mecánico	6	Motor		
		7	Dispositivo de accionamiento		
		8	Dispositivo de soporte		
		9	Sellado del horno		
		CARACTERÍSTICAS			
		Diámetro	2.8 m		
		Largo	44.8 m		
		Velocidad de rotación	14.33 rpm		
		Inclinación	1°		
		Motor de alimentación	55 kW		


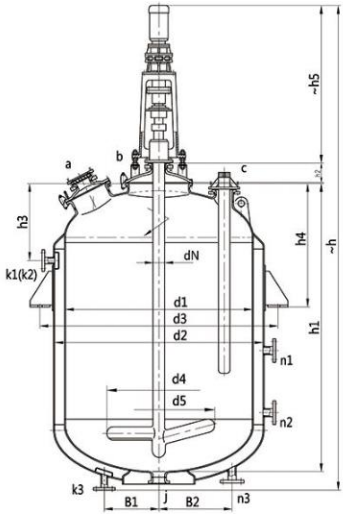
Nota. Equipo seleccionado y dimensionado conforme cálculo 11. Elaboración propia.

Figura 27. Hoja de especificaciones de enfriador rotatorio

		Hoja de especificaciones de enfriador rotatorio	
No. :	W-002	Hecho por :	Laura Pereira
Nombre :	Enfriador rotatorio	Revisado por :	
No. Documento :	W-P13	Aprobado por :	
Modelo:	YCI200-4B	Descripción:	Especificaciones técnicas para enfriador rotatorio
Localización:			
Planta:	Producción de azufre elemental y cal hidratada		
ESPECIFICACIONES		DIAGRAMA DEL EQUIPO	
Flujos	Sulfuro de Calcio 3026.13 kg/h		
	Aire frío 3806.55 kg/h		
Temperatura	Sulfuro de calcio ingresa a 625°C		
	Aire frío ingresa a 20°C		
Proceso	Enfriamiento		
DATOS TÉCNICOS		CARACTERÍSTICAS	
Modelo de reductor	ZQ400	Diámetro	2.8 m
Ángulo adaptable		Longitud	4.30 m
Estructura compacta		Capacidad	3-4 t/h
Fácil mantenimiento		Ángulo de instalación	3-5%
		Velocidad de rotación	5 rpm
		Motor	7.5 kW
		Peso	9.5 t

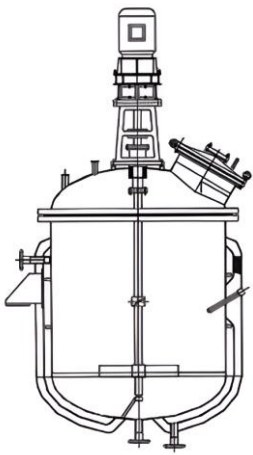
Nota. Equipo selecciona y dimensionado conforme cálculo 12. Elaboración propia.

Figura 29. Hoja de especificaciones de reactor de hidratación

		Hoja de especificaciones de reactor de hidratación			
No. :	R-001	Hecho por :	Laura Pereira		
Nombre :	Reactor de hidratación	Revisado por :			
No. Documento :	W-P16	Aprobado por :			
Modelo :		Descripción :	Especificaciones técnicas para reactor de hidratación		
Localización :					
Planta :	Producción de azufre elemental y cal hidratada				
ESPECIFICACIONES		DIAGRAMA DEL EQUIPO			
Flujos	Sulfuro de Calcio 3026.13 kg/h				
	Agua 5599.95 kg/h				
Temperatura	Sulfuro de Calcio				
	25°C				
Proceso	Reacción hidratación				
DATOS TÉCNICOS				a	Boca de inspección
Número de deflectores	3.00			b	Boca de agitador
Ancho de la placa deflectora	0.132 m			c	Vaina termométrica
Número de paletas	3.00			Características	
Espacio entre placa y tanque	0.0316 m	Diaméto del equipo	1.584 m		
Ancho de la paleta	0.106 m	Altura del equipo	2.376 m		
Distancia fondo a base de impulsor	0.528 m	Diaméto del impulsor	0.528 m		
Diámetro disco	0.264 m	Largo de la paleta	0.132 m		
Tipo de agitador	Impulsor A310	Volumen real	4,061 L		
Velocidad de giro	500 rpm				
Potencia motor requerida	18.5 HP				


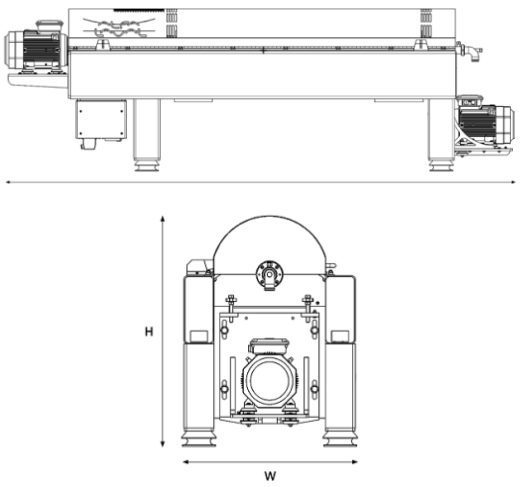
Nota. Equipo dimensionado y seleccionado cálculo 13. Elaboración propia.

Figura 30. Hoja de especificaciones de reactor térmico

CHNZ		Hoja de especificaciones de reactor térmico	
No. :	R-002	Hecho por :	Laura Pereira
Nombre :	Reactor térmico	Revisado por :	
No. Documento :	W-P17	Aprobado por:	
Modelo:		Descripción:	Especificaciones técnicas para reactor termico
Localización:			
Planta:	Producción de azufre elemental y cal hidratada		
ESPECIFICACIONES		DIAGRAMA DEL EQUIPO	
Flujos	Sturry Ca(OH) ₂ , H ₂ Sy agua 8,626.09 kh/h		
Temperatura	Sturry Ca(OH) ₂ , H ₂ Sy agua 25°C		
Proceso	Reacción stripping		
DATOS TÉCNICOS		Características	
Número de deflectores	3.00	Diaméto del equipo	1.698 m
Ancho de la placa deflectora	0.142 m	Altura del equipo	2.548 m
Número de paletas	3.00	Díametro del impulsor	0.566 m
Espacio entre placa y tanque	0.0340 m	Largo de la paleta	0.142 m
Ancho de la paleta	0.113 m	Volumen real	5,002 L
Distancia fondo a base de impulsor	0.528 m		
Díametro disco	0.283 m		
Tipo de agitador	Agitador de pala inclinada		
Velocidad de giro	100 rpm		
Potencia motor requerida	0.8 HP (0.59656 Kw)		



Nota. Equipo dimensionado y seleccionado cálculo 13. Elaboración propia.

Figura 31. Hoja de especificaciones de centrífuga

		Hoja de especificaciones de centrífuga	
No. :	F-003	Hecho por :	Laura Pereira
Nombre :	Centrífuga	Revisado por :	
No. Documento :	W-P18	Aprobado por:	
Modelo:	ALDEC 115	Descripción:	Especificaciones técnicas para centrífuga
Localización:			
Planta:	Producción de azufre elemental y cal hidratada		
ESPECIFICACIONES		DIAGRAMA DEL EQUIPO	
Flujos	Slurry Ca(OH) ₂ y agua 5,451.81 kh/h		
Temperatura	Slurry Ca(OH) ₂		
	H ₂ O y agua 60°C		
Proceso	Separación		
DATOS TÉCNICOS			
Potencia motor principal	37-160 kW		
Potencia motor auxiliar	15-30 kW		
Frecuencia variable			
Fuerza centrífuga necesaria	1,000 Gs		
Fuerza centrífuga máxima equipo	3,150 Gs		
Capacidad máxima de procesamiento	35 GPM	Largo (L)	6.502 m
Material de construcción	Acero inoxidable	Ancho (W)	1.450 m
		Altura (H)	1.791 m
		Peso máximo	6,500 kg

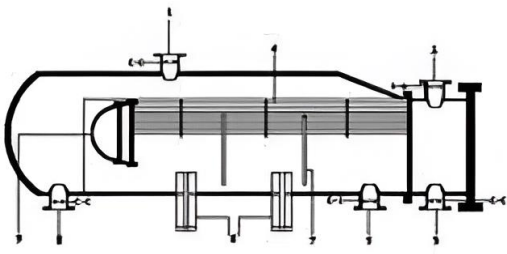
Nota. Equipo seleccionado conforme flujos. Elaboración propia.

Figura 32. Hoja de especificaciones de molino de alta presión

		Hoja de especificaciones de molino de alta presión			
No. :	Z-004	Hecho por :	Laura Pereira		
Nombre :	Molino de alta presión	Revisado por :			
No. Documento :	W-P19	Aprobado por:			
Modelo:	YGM95	Descripción:	Especificaciones técnicas para molino de alta presión		
Localización:					
Planta:	Producción de azufre elemental y cal hidratada				
ESPECIFICACIONES		DIAGRAMA DEL EQUIPO			
Flujos	Ca(OH) ₂ , mayor 20 µm 1,237.37 kh/h				
Temperatura	Ca(OH) ₂ , mayor 20 µm 60°C				
Proceso	Trituración				
DATOS TÉCNICOS				Características	
				Rodillo	4.00
				Tamaño de ingreso	<0.025 m
		Tamaño de salida	35 a 400 mallas		
		Capacidad	1.1-5.6 TPH		
		Potencia	79.5 kW		
Rodillo de molienda					
	Diámetro	0.210 m			
	Altura	0.170 m			
Anillo de molienda					
	Diámetro	1.050 m			
	Altura	0.170 m			

Nota. Equipo seleccionado conforme flujos. Elaboración propia.

Figura 34. Hoja de especificaciones de caldera de recuperación de calor

Hoja de especificaciones caldera de recuperación de calor			
No. :	D-003	Hecho por :	Laura Pereira
Nombre :	Caldera de recuperación de calor	Revisado por :	
No. Documento :	W-F21	Aprobado por:	
Modelo:		Descripción:	Especificaciones técnicas para caldera de recuperación de calor
Localización:			
Planta:	Producción de azufre elemental y cal hidratada		
ESPECIFICACIONES		DIAGRAMA DEL EQUIPO	
Flujos	H ₂ S, N ₂ , SO ₂ , H ₂ O y S ₈ 9011.04 kg/h		
Temperatura	H ₂ S, N ₂ , SO ₂ , H ₂ O y S ₈ 1177°C		
Proceso	Intercambiador de calor Recuperar calor de los gases de combustión		
DATOS TÉCNICOS		Características	
Caldera de tubos de fuego		Área de transferencia de calor	25.9 m ²
Disposición	Horizontal	Diámetro interior de la carcasa	0.95 m
Fluido de lado de la carcasa	Agua	Número de tubos	91.00
Fluido delado de los tubos	Gases ácidos	Diámetro interior del tubo	0.022 m
Carga térmica	103107 kJ/h	Diámetro exterior del tubo	0.0245 m
Flujo del lado de la carcasa	324103 kg/mol/h	Longitud del tubo	3.6 m
Temperatura inicial del agua	25°C	Paso de tubos (distancia entrecentro de dos tubos)	Triangular (0.032 m)
Temperatura de salida de agua	440°C	Despeje	0.08 m
Temperatura inicial del gas	1177°C	Caída de presión carcasa	45 kPa
Temperatura de salida del gas	649°C	Caída de presión tubos	42 kPa

Nota. Equipo dimensionado como se muestra en el cálculo 14. Elaboración propia.

Figura 35. Hoja de especificaciones condensador

		Hoja de especificaciones condensador	
No. :	W-003	Hecho por :	Laura Pereira
Nombre :	Condensador	Revisado por :	
No. Documento :	W-P22	Aprobado por:	
Modelo:		Descripción:	Especificaciones técnicas para condensador
Localización:			
Planta:	Producción de azufre elemental y cal hidratada		
ESPECIFICACIONES		DIAGRAMA DEL EQUIPO	
Flujos	H ₂ S, N ₂ , SO ₂ , H ₂ O y S ₈ 9011.04 kg/h		
Temperatura	H ₂ S, N ₂ , SO ₂ , H ₂ O y S ₈ 649°C		
Proceso	Condensación		
DATOS TÉCNICOS		Características	
Condensador de carcasa y tubos			
Pasadas de carcasa	1	Temperatura de entrada de vapor	118.3°C
Pasadas de tubo	1	Temperatura de salida de vapor	143°C
Patrón de tubo	Triangular	Temperatura de entrada de la mezcla	243.3°C
Área de transferencia de calor	89.5 m ²	Temperatura de salida de la mezcla	124.4°C
Número de tubos	170	Caída de presión carcasa	24 kPa
Tipos de defletores	Baffle segmentado corte del 25%	Caída de presión tubos	19 kPa
Número de defletores	6	Coefficiente de transferencia de calor tubo	12.824 BTU/(hr*ft ² *°F)
Coefficiente de transferencia de calor general	26.7 W/ m ² *K	Coefficiente de transferencia de calor carcasa	11 BTU/(hr*ft ² *°F)

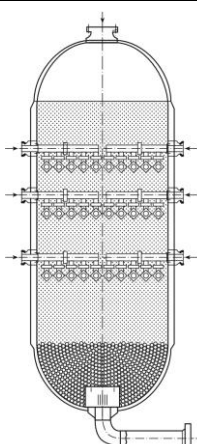
Nota. Equipo dimensionado como se muestra en el cálculo 14. Elaboración propia.

Figura 36. Hoja de especificaciones de calentador

		Hoja de especificaciones calentador	
No. :	W-004	Hecho por :	Laura Pereira
Nombre :	Calentador	Revisado por :	
No. Documento :	W-P23	Aprobado por:	
Modelo:		Descripción:	Especificaciones técnicas para calentador
Localización:			
Planta:	Producción de azufre elemental y cal hidratada		
ESPECIFICACIONES		DIAGRAMA DEL EQUIPO	
Flujos	H ₂ S, N ₂ , SO ₂ , H ₂ O y S ₈ 8116.16 kg/h		
Temperatura	H ₂ S, N ₂ , SO ₂ , H ₂ O y S ₈ 124°C		
Proceso	Intercambiador de calor		
	Aumentar de vapor de 124°C a 196.6°C		
DATOS TÉCNICOS		Características	
Fluido del lado interior de la tubería	Vapor	Área de transferencia de calor	8.6 m ²
Temperatura del lado interior de la tubería	440°C-440°C	Coefficiente de transferencia de calor	402 kJ hr* m ² *°C
Número de cédula del interior de la tubería	40	Fluido del lado del anillo	Gases del proceso
Material de carcaza	Carbón grafito	Temperatura del lado del anillo	124.4°C-196.6°C
Temperatura límite lado interior de la tubería	500°C	Número de cédula del interior de la tubería	40
Caída de presión del lado interior de la tubería	6.3 kPa	Material del tubo	Acero bajo carbono
		Temperatura límite lado interior de la tubería	0°C-230°C
		Caída de presión del lado interior de la tubería	49.9 kPa

Nota. Equipo dimensionado como se muestra en el cálculo 14. Elaboración propia.

Figura 37. Hoja de especificaciones de reactores catalíticos

Hoja de especificaciones reactores catalíticos			
No. :	R-003	Hecho por :	Laura Pereira
Nombre :		Revisado por :	
No. Documento :	W-P24	Aprobado por:	
Modelo:		Descripción:	Especificaciones técnicas para reactores catalíticos
Localización:			
Planta:	Producción de azufre elemental y cal hidratada		
ESPECIFICACIONES		DIAGRAMA DEL EQUIPO	
Flujos	H ₂ S, N ₂ , SO ₂ , H ₂ O y S ₈ 8116.16 kg/h		
Temperatura	H ₂ S, N ₂ , SO ₂ , H ₂ O y S ₈ 248°C		
Proceso	Reacción		
DATOS TÉCNICOS			
Reactor de lecho fijo			
Catalizador	Alúmina activada (columnas esféricas)		
Modo de operación	Proceso adiabático		
Espacio tiempo	6 segundos	Características	
Volumen de lecho catalizador	29.4 m ³	Volumen del reactor	39.14 m ³
Fracción vacía del reactor	0.40	Longitud del reactor	7.66 m
Peso del catalizador	28429 kg	Diámetro del reactor	2.55 m
Peso del acero	9479 kg	Caída de presión del reactor	13440 N/m ²
		Grosor pared reacto	0.05 m

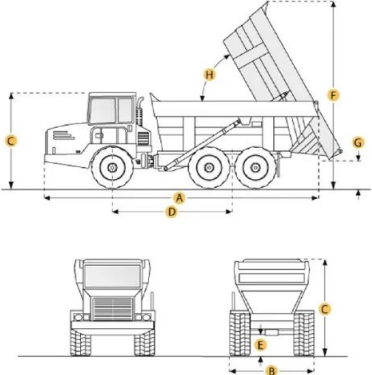
Nota. Equipo dimensionado como se muestra en el cálculo 13. Elaboración propia.

Figura 38. Hoja de especificación de retroexcavadora

CASE CONSTRUCTION		Hoja de especificaciones de retroexcavadora	
No. :		Hecho por :	Laura Pereira
Nombre :	Retroexcavadora	Revisado por :	
No. Documento :	V-P01	Aprobado por:	
Modelo:	FPT-F4GE945K* J607	Descripción:	Especificaciones técnicas retroexcavadora
Localización:			
Planta:	Producción de azufre elemental y cal hidratada		
FLUIDO		DIAGRAMA DEL EQUIPO	
Materiales	Carbón vegetal		
	Yeso dihidratado		
Potencia	Potencia neta (SAE J1340) 79 HP (59 kW) a 2.200 rpm		
	Potencia Bruta (ISO 14396) 85 HP (63 kW) a 2.200 rpm		
Peso operación	7.791 kg		
DATOS TÉCNICOS		DIAGRAMA DEL EQUIPO	
Caudal de la bomba hidráulica a 2.200 rpm	108 l/min a 231 bar	A Altura máxima de operación	4.240 m
Bomba de los implementos hidráulicos	Bomba de engranajes	B Perno articulación del balde altura máxima	3.500 m
Tipo de transmisión	Powershuttle	C Perno de articulación del balde posición transporte	0.324 m
Fuerza de excavación del brazo de penetración	29.5 kN (3.007 kgf)	D Ángulo de descarga	45°
Fuerza de excavación del balde trasero	50.4 kN (5.141 kgf)	E Altura de descarga máxima	2.730 m
Elevación del brazo de excavación a 3.660 mm (12')	1.877 kg (4.138 lb)	F Alcance de descarga altura total	0.685 m
Capacidad máxima del cucharón cargador coronado	1.0 m³ (1.3 yd³)	G En la línea del suelo	40°
Capacidad de levantamiento de la cargadora hasta la altura máxima (plano horizontal)	30.26 kN (3,086 kgf)	H En posición del transporte	46°
Fuerza de rompimiento de la cargadora-cilindros de basculante	47.25 kN (4,818 kgf)	J A altura máxima	Ajustable
		K Profundidad de excavación	0.156 m
		L Alcance desde el centro del eje delantero	2.050 m
		CARACTERÍSTICAS	
		Tiempo de descenso (manual)	2.5 s
		Tiempo de descenso (retorno excavación)	3.6 s
		Autonivelación automática	
		Indicador de posición del balde	


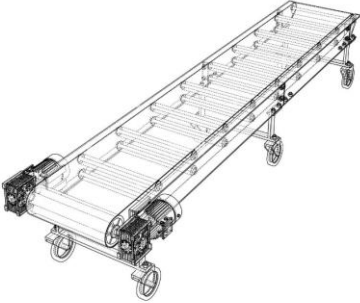
Nota. Equipo seleccionado el volumen de la materia prima y camión de volteo. Elaboración propia.

Figura 39. Hoja de especificaciones de camión de volteo

CATERPILLAR		Hoja de especificaciones de camión de volteo			
No. :		Hecho por :	Laura Pereira		
Nombre :	Camión de volteo	Revisado por :			
No. Documento :	V-P02	Aprobado por:			
Modelo:	CATERPILLAR 730, C11 ACERT	Descripción:	Especificaciones técnicas camión de volteo		
Localización:					
Planta:	Producción de azufre elemental y cal hidratada				
FLUJO		DIAGRAMA DEL EQUIPO			
Materiales	Carbón vegetal				
	Yeso dihidratado				
Potencia	Potencia neta 329 HP (245.335 KW)				
	Potencia Bruta 355 HP (264.723 KW)				
Tiempo	Bajada 12 s				
	Subida 12 s				
DATOS TÉCNICOS					
Tamaño de llanta 23.5 R25				A Largo total 9.92 m	
Velocidad máxima 55.3 km/h		B Ancho total 2.877 m			
Aspiración Turbocargada		C Altura total 3.44 m			
Desplazamiento de motor 11.2 Lt		D Distancia entre ejes 4.669 m			
Marca de motor Caterpillar		E Distancia libre de piso a máquina 0.495 m			
Número de cilindros 6		F Altura de vaciado 0.650 m			
Número de marchas adelante 6		G Distancia del piso al vertedero 0.555 m			
Número de marchas en reversa 1		CARACTERÍSTICAS			
Carga total 50,970 kg		Eje central cargado 17700 kg			
Capacidad al tope 13.1 m ³		Eje central vacío 5000 kg			
Capacidad al tope 16.9 m ³		Eje trasero cargado 1740 kg			
		Eje trasero vacío 4710 kg			
		Total vacío 22850 kg			


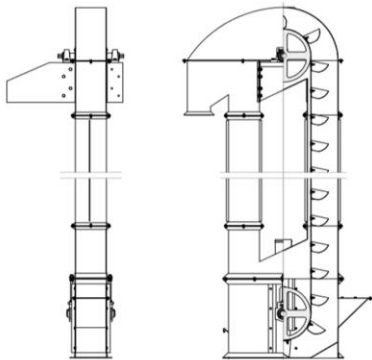
Nota. Equipo seleccionado tomando en cuenta el volumen aparente de materia prima como el calculado en el cálculo 3. Elaboración propia.

Figura 41. Hoja de especificaciones de bandas transportadoras

		Hoja de especificaciones de bandas transportadoras	
No. :	H-001	Hecho por :	Laura Pereira
Nombre :	Banda transportadora	Revisado por :	
No. Documento :	W-F08	Aprobado por:	
Modelo:	B650	Descripción:	Especificaciones técnicas para bandas transportadoras
Localización:			
Planta:	Producción de azufre elemental y cal hidratada		
ESPECIFICACIONES		DIAGRAMA DEL EQUIPO	
Flujos	Yeso dihidratado: 4145.83 kg/h		
	Cabón vegetal: 8333.3 kg/h		
Temperatura	Materia prima		
	ingresa a 25°C		
Proceso	Transporte		
DATOS TÉCNICOS		CARACTERÍSTICAS	
Aplicaciones	Materiales de construcción, metalurgia, carbón, etc.	Ancho de cinta	0.650 m
Potencia	0.13 kW	Tamaño de rodillo	φ0.089* 0.240 m
Inclinación	21.8°	Rodillo inferior	φ0.089* 0.750 m
Largo	5 m	Tambor matriz	φ0.400* 0.075 m
Altura	2 m	Tambor de cola	φ0.273* 0.750 m
Estructura sencilla		Velocidad	1.0-1.5 m/s
Fácil reparación			
Estandarización de Partes			
Velocidad adaptable			
Pesa incluida			


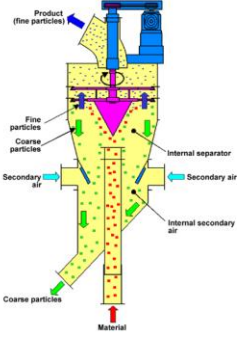
Nota. Equipo seleccionado basado en el dimensionamiento del cálculo 7. Elaboración propia.

Figura 42. Hoja de especificaciones de elevadores de canjilones

		Hoja de especificaciones de elevadores de canjilones			
No. :	H-005	Hecho por :	Laura Pereira		
Nombre :	Elevador de canjilones	Revisado por :			
No. Documento :	W-P15	Aprobado por:			
Modelo:	TZD400	Descripción:	Especificaciones técnicas para elevador de canjilones		
Localización:					
Planta:	Producción de azufre elemental y cal hidratada				
ESPECIFICACIONES		DIAGRAMA DEL EQUIPO			
Flujos	Sulfuro de Calcio 3026.13 kg/h				
Temperatura	Sulfuro de Calcio 30°C				
Proceso	Traslado de sólidos				
DATOS TÉCNICOS				CARACTERÍSTICAS	
Ancho de la banda	0.200 m			Capacidad de cucharón de acero	4 t/h
Diámetro de la polea de cabeza	0.630 m			Paso de cucharón de acero	0.300 m
Diámetro de la polea de cola	0.500 m	Volumen del cucharón de acero	1.21 L		
Velocidad del cucharón	1.76 m/s				
Velocidad de rotación del eje de la cabeza	53.5 r/min				


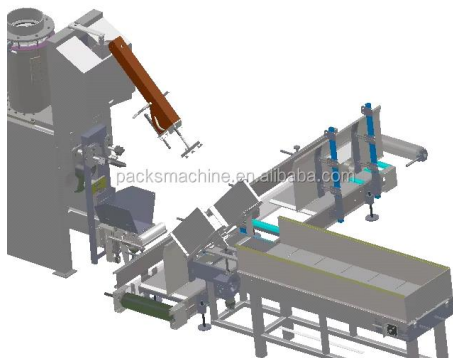
Elaboración propia.

Figura 44. Hoja de especificaciones de separador de polvo

		Hoja de especificaciones separador de polvo	
No. :	F-004	Hecho por :	Laura Pereira
Nombre :		Revisado por :	
No. Documento :	W-P25	Aprobado por :	
Modelo :		Descripción :	Especificaciones técnicas para separador de polvo
Localización :			
Planta :	Producción de azufre elemental y cal hidratada		
ESPECIFICACIONES		DIAGRAMA DEL EQUIPO	
Flujos	Ca(OH) ₂ 2.291.43 kg/h		
Temperatura	Ca(OH) ₂ a 60°C		
Proceso	Separación		
DATOS TÉCNICOS		Características	
Capacidad de casificación	1.7 a 6.8 t/h	Revoluciones por minuto	100-400
Apto para distintos materiales	Carbón Pigmentos Cal hidratada Talco Coque	Motor	9.5 kW
Ideal para materiales con alta propiedad adhesiva		Aire que puede trabajar	230-280 m ³ /min
Fácil montaje			

Nota. Equipo seleccionado en base a flujos. Elaboración propia.

Figura 45. Hoja de especificación de máquina de llenado de bolsas

		Hoja de especificaciones de máquina de llenado de bolsas	
No. :	K-007	Hecho por :	Laura Pereira
Nombre :	Máquina de llenado de bolsas	Revisado por :	
No. Documento :	W-P26	Aprobado por:	
Modelo:	PEPV50	Descripción:	Especificaciones técnicas para máquina de llenado de bolsas
Localización:			
Planta:	Producción de azufre elemental y cal hidratada		
ESPECIFICACIONES		DIAGRAMA DEL EQUIPO	
Flujos	Ca(OH) ₂ 2,291.43 kh/h		
Temperatura	Ca(OH) ₂ 25°C		
Proceso	Empaquetado		
DATOS TÉCNICOS		Características	
Potencia motor principal	5 kW	Largo (L)	1.700 m
Capacidad	100 bolsas/hora	Ancho (W)	0.800 m
Tipo de empaquetado	Bolsas	Altura (H)	2.350 m
Voltaje	380 V	Peso de la bolsa	10-50 kg
Material de relleno	Polvo, productos de gránulo		
Peso	110 kg		
Consumo de aire	40 m ³ /h		
Control	Control PLC		

Nota. Equipo seleccionado en base a flujos. Elaboración propia.

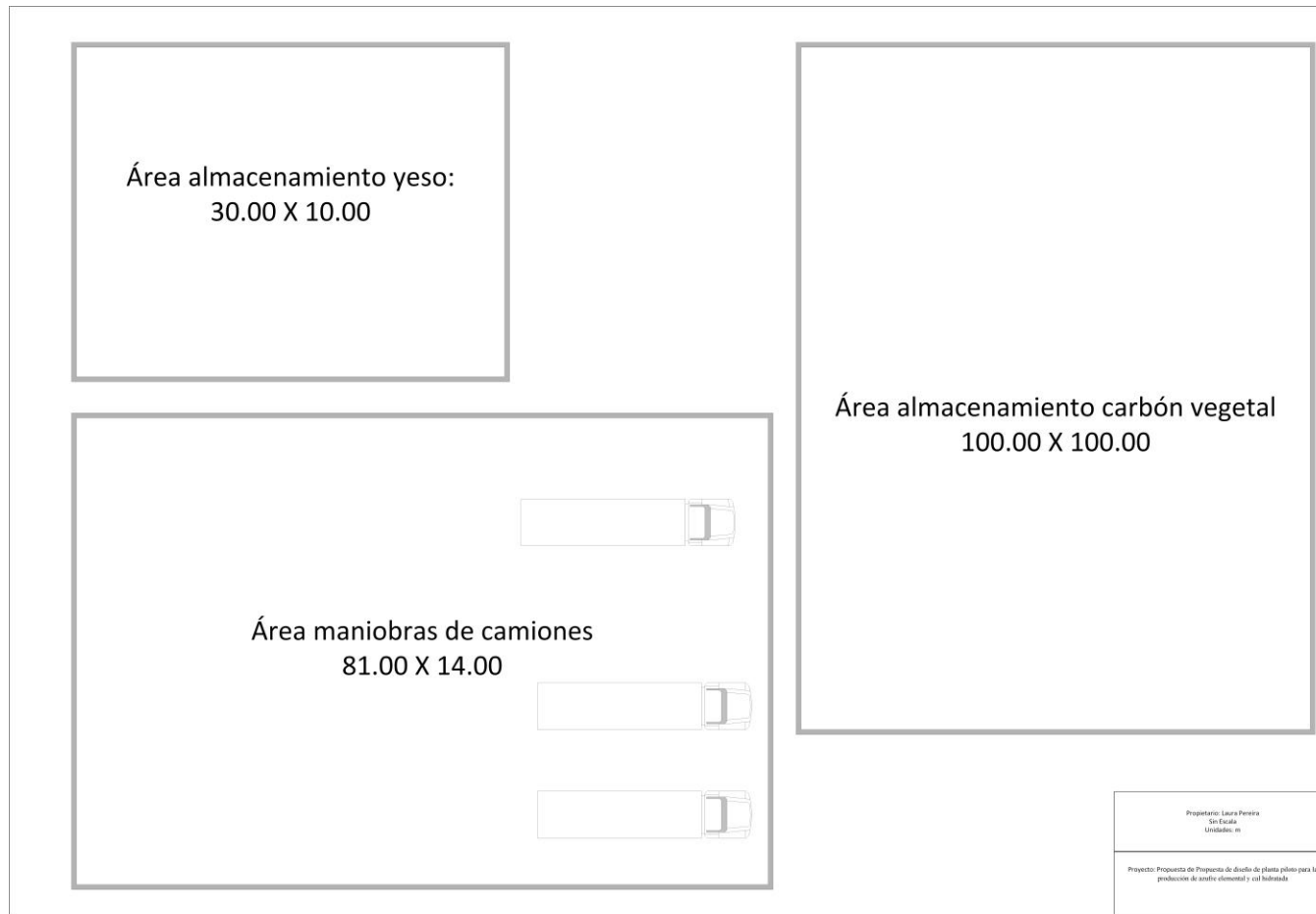
E. Información de equipos y maquinaria

Código	Equipo
A-001	Pila de materia prima
D-001	Horno rotatorio
D-002	Horno de reacción
D-003	Caldera de recuperación de calor
F-001	Criba vibratoria
F-002	Ciclón
F-003	Centrifuga
F-004	Separador partículas
H-001	Banda transportadora
H-002	Banda transportadora
H-003	Banda transportadora
H-004	Banda transportadora
H-005	Elevador de canjilones
H-006	Banda transportadora
H-007	Elevador de canjilones
H-008	Banda transportadora
H-009	Banda transportadora
K-001	Tolva de alimentación
K-002	Silo de almacenamiento
K-003	Tanque de almacenamiento
K-004	Tanque de almacenamiento
K-005	Tolva de alimentación
K-006	Tanque de almacenamiento
K-007	Máquina de llenado de bolsas
K-008	Almacenamiento
R-001	Reactor de hidratación
R-002	Reactor térmico
R-003	Reactor catalítico
R-004	Reactor catalítico
R-005	Reactor catalítico
W-001	Precalentador vertical
W-002	Enfriador rotatorio
W-003	Condensador
W-004	Calentador
W-005	Condensador
W-006	Calentador
W-007	Condensador
W-008	Calentador
W-009	Condensador

Código	Equipo
X-001	Alimentador banda
Z-001	Trituradora de mandíbula
Z-002	Trituradora de mandíbula
Z-003	Molino de bolas
Z-004	Molino de alta presión

F. Áreas de planta piloto

Figura 46. Propuesta de áreas de almacenamiento



Elaboración propia.

Figura 47. Propuesta de áreas de planta



Elaboración propia.

G. Localización de planta

Cuadro 76. Posible localización de planta de producción de azufre y cal hidratada

Factores	Peso relativo (%)	Alternativas (Puntaje)			Alternativas (Puntaje relativo)		
		Palín, Escuintla	Villa Nueva, Guatemala	Chicamán, Quiché	Palín, Escuintla	Villa Nueva, Guatemala	Chicamán, Quiché
Acceso a energía eléctrica	25	9.7	9.9	8.5	24.25	24.75	21.25
Proximidad a materia prima	18	5	5	8	9	9	14.4
Acceso a transporte y distribución	22	8	8	5	17.6	17.6	11
Disponibilidad de energía	15	8	6	9	12	9	13.5
Cumplimiento ambiental	6	7.5	7.3	8	4.5	4.38	4.8
Mano de obra y acceso a servicios	6	9	5	6	5.4	3	3.6
Clima	8	9	9	8	7.2	7.2	6.4
TOTAL	100				79.95	74.93	74.95

Nota. El puntaje otorgado a cada lugar es sobre 10 puntos, y el puntaje relativo ya toma en cuenta el peso relativo de cada uno de los factores. Lo que se aprecia en el cuadro anterior es que Palín, Escuintla es la localización más favorable. Elaboración propia.

H. Cotizaciones

Figura 48. Cotización Joyal Crusher PE250*400



JOYAL

JOYAL SOLUTION

SHANGHAI JOYAL MACHINERY CO., LTD.

**Trituradora de Mandíbula
PE250*400 (10" x 16")
Contaco: Clara Zhang
WhatsApp: +86 13585585269**

Shanghai Joyal Mining Machinery Co., Ltd. is a high-tech enterprise, which is specializing in the research, development and manufacture of industrial stone crushing & screening equipments, grinding mills, mining equipments and so on. Our company has already formed a full set of modern production line, equipped with intelligent, standardized testing and controlling laboratories, owned a professional team for R&D, production, sales and service.

I.

Lista de Precio							
	Nombre	Modelo	Potencia (kW)	Precio Unitario (USD)	QTY.	Precio Total (USD)	Descripción
1	Trituradora de Mandíbula (Soldadura)	PE250*400 (10"x 16")	15	6,290	1	6,290	Incluyendo mandíbula móvil, mandíbula fija, placa de articulación, eje excéntrico, rodamientos, sistema de ajustes, motor, sistema de transmisión, sistema de protección y estructura.
2	Tablero de Control	Estándar	15	239	1	239	Configuración de trituradora de mandíbula
Precio EXW de fabrica						6,529	
Precio FOB en Puerto Shanghai, China						6,979	
Precio CIF a Puerto Quetzal, Guatemala (Carga Suelta)						7,500	
Piezas de Desgaste Aparte (opcional)							
1	Mandíbula fija	PE250*400 (10"x 16")	-	254	1	254	Total precio de repuestos: USD 907
2	Mandíbula móvil		-	277	1	277	
3	Placas laterales izquierda		-	118	1 juego	118	
4	Placas laterales derecha		-	118	1 juego	118	
5	Toggle plate		-	140	1	140	



Términos comerciales

■ Condiciones de pago

El 30 % del monto total debe pagarse por adelantado (T/T), el 70 % del monto total debe pagarse por T/T antes de que los productos se envíen desde la fábrica del Vendedor.

■ El tiempo de entrega

30-35 días hábiles desde la recepción del anticipo.

■ Documentación técnica

Dentro de los 5 días hábiles posteriores a la recepción del depósito, el vendedor proporcionará el manual de instrucciones y todo lo relacionado con el dibujo.

■ Seguro de calidad

Los artículos deben ser nuevos de fábrica. El vendedor garantiza la calidad del equipo (a excepción de las piezas de desgaste) durante un año a partir de la fecha de finalización de la instalación y depuración, pero no más de 18 meses después de la entrega de la mercancía.

■ Instalación y depuración

El vendedor puede proporcionar diagramas, instrucciones para instalar y operar el equipo. Si el comprador necesita ayuda para instalar y depurar el equipo, debe informar al vendedor al respecto. El vendedor, a su vez, enviará un especialista para instalar y depurar el equipo en el sitio. El comprador es responsable de los gastos del especialista (incluidos la comida y el alojamiento reales, el pasaje aéreo de ida y vuelta, una dieta de \$120 por día). El comprador debe preparar todos los materiales y equipos necesarios para la instalación y depuración.

■ Paquete

Los productos deben tratarse como a prueba de herrumbre y de humedad antes de la entrega.

Requisitos

Empresa: Shanghai Joyal Machinery Co., Ltd.

Dirección: No.365, Chuanhong Road, Pudong New Area, Shanghai, China.

Banco: BANCO DE CHINA, SHANGHAI, SUCURSAL DE PUDONG

Banco Address: NO.838 ZHANGYANG ROAD, SHANGHAI, CHINA

No. Cuenta: 4390 6127 1942

Código SWIFT: BKCH CNBJ300



XIII. GLOSARIO

- **AASHTO.** La American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) es una organización sin fines de lucro que representa a los departamentos de transporte de los 50 Estados de EE.UU., el Distrito de Columbia y Puerto Rico. Se dedica a establecer normas técnicas y publicar especificaciones, protocolos de prueba y directrices utilizadas en el diseño y construcción de carreteras y puentes en todo Estados Unidos.
- **ASTM.** ASTM International, anteriormente conocida como la American Society for Testing and Materials, es una organización global que desarrolla y publica normas técnicas voluntarias para una amplia gama de materiales, productos, sistemas y servicios. Fundada en 1902, se dedica a mejorar la calidad de los productos y servicios a través de la estandarización¹.
- **ITINTEC.** El Instituto de Investigación Tecnológica, Industrial y de Normas Técnicas fue una institución peruana dedicada a la investigación tecnológica y la normalización industrial. Fundado en 1979, jugó un papel crucial en el desarrollo de políticas tecnológicas y la promoción de la investigación científica y tecnológica en Perú.
- **IUSI.** Impuesto único sobre inmuebles, un impuesto que deben pagar los propietarios de bienes inmuebles en Guatemala
- **XRF.** Fluorescencia de rayos X. La fluorescencia de rayos X es una técnica analítica que se puede utilizar para determinar la composición química de una amplia variedad de tipos de muestras, entre los que se encuentran sólidos, líquidos, lodos y polvos sueltos. La XRF también se utiliza para determinar el espesor y la composición de capas y recubrimientos.