



Facultad de Metalurgia y Electromecánica
Departamento de Metalurgia
Carrera de Ingeniería en Metalurgia y Materiales.

Trabajo de diploma en opción al título
de ingeniera en metalurgia y materiales.

Caracterización del sistema de alimentación, procesamiento
y traslado del azufre en la empresa Moa Nickel S.A.

AUTOR(A): Leydis Aguirre Ramírez.

MOA-2



Facultad de Metalurgia y Electromecánica
Departamento de Metalurgia
Carrera de Ingeniería en Metalurgia y Materiales.

Caracterización del sistema de alimentación, procesamiento
y traslado del azufre en la empresa Moa Nickel S.A.

AUTOR(A): Leydis Aguirre Ramírez

TUTOR(ES):

Ing. Katerin Ramírez Ramírez
M.Sc. Airem Garbey Frometa

MOA-2023

AGRADECIMIENTOS

Luego de culminado este trabajo llega quizás la parte más difícil, los agradecimientos, pues son tantas las personas que han influido en mi formación académica y social, que sería injusto omitir alguna de estas:

- ❖ Primeramente, le agradezco a Dios por ser el motor principal en mi vida, por acompañarme y permitirme confiarle mis anhelos con la certeza de que estos se materializarán.
- ❖ Les agradezco a mis padres por creer en mí, por apoyarme durante toda mi vida y por inculcarme desde muy pequeña el significado de perseverar y luchar. Quiero que sepan que les amo.
- ❖ Les agradezco a mis tutoras, en especial a Katerin Ramírez Ramírez, por su cooperación para la realización de este trabajo, por su voluntad, orientación y dedicación absoluta durante todo el desarrollo de la investigación.
- ❖ A los profesores del departamento de metalurgia y materiales por contribuir de forma desinteresada en mi formación como ingeniera metalúrgica.
- ❖ A todo el departamento de tecnología de los procesos de Moa Nickel S.A, por acogerme allí con tanto amor y por ayudarme siempre que les necesite.
- ❖ A Yaimit Batista Osorio, gran persona a la que estimo mucho, la cual me dedicó tiempo, y más que tiempo, me dio su amistad y su apoyo incondicional e hizo posible la continuación de este proyecto.
- ❖ A mis amigos y compañeros de viaje, pues, hoy nos toca cerrar un capítulo maravilloso en esta historia de nuestras vidas, y no puedo dejar de agradecerles por su apoyo y constancia, al estar en las horas más difíciles, por compartir horas de estudio. Gracias por estar siempre allí.”
- ❖ Les agradezco a todos los miembros de mi familia que estuvieron siempre al pendiente
- ❖ Por último, pero no menos importante les agradezco, a todas esas personas que hoy no menciono, pero que sin duda alguna aportaron su granito de arena.

De todo corazón gracias a todos. Este logro más que mío, es de todos ustedes, los que lo hicieron posible y jamás me alcanzarán las palabras para agradecerles, por tanto. Pues como dice Althea Gibson: Cualesquiera que hayan sido nuestros logros, alguien nos ayudó siempre a alcanzarlos.”

DEDICATORIA

- ❖ Al creador de todas las cosas, el que me ha dado fortaleza para continuar cuando a punto de caer he estado; por ello, con toda la humildad que de mi corazón puede emanar, dedico primeramente mi trabajo a Dios.
- ❖ A mis padres, los que siempre han sido mis mejores guías de vida. Pero en especial a mi madre, esa gran mujer merecedoras del más alto reconocimiento por haber dedicado gran parte de su vida, por no decir toda su vida, a educarme y sobre todo a motivarme y alentarme durante toda mi carrera estudiantil.
- ❖ A mi tío Leonardo Aguirre Zúñiga, quien me alentó en varias ocasiones, y no permitió que me rindiera durante todo el camino.
- ❖ A mi mejor amiga, Osleydis Daniela Acuña Espinosa que a pesar de estar muy lejos, siempre estuvo cerca.

RESUMEN

En esta investigación, se analizó la situación actual de los sistemas de derretimiento, filtrado y trasiego de azufre en la Planta de Derretimiento de azufre de Moa Nickel, para establecer propuestas de mejoras y optimización a dichos sistemas. Se encontró que hubo un incremento de la acidez y de la humedad que pudiera estar asociado a la manipulación, al transporte de azufre a granel, al almacenamiento al aire libre, a la activación de la acción microbiológica, fuente fundamental de la acidez. Se reflejó el comportamiento estable del hierro y del cianuro. Se determinó que, a pesar de estarse llevando a cabo el derretimiento, producto al tamaño de partícula de la materia, a la gran velocidad de agitación, lo que favorece la velocidad del derretimiento, las situaciones de trabajo en las que se está operando, no es favorable, ya que los derretidores 1 y 2, constan de un área de transferencia de 180 m² cada uno, y el 3, de 330,72 m², teóricamente se necesita en el 1 y 2; 2200 m² de área, y en el tres, 10,036 m², representando esto, 12 y 30 veces más, el área empleada. Se pudo evidenciar que el calor empleado no es el suficiente para derretir el azufre, se demanda 1499 kW en el 1 y el 2, y 431 kW, en el 3. El consumo de vapor en los derretidores debería de ser de 38008 lb/h y 50404 lb/h, esto explica que se debe de consumir más vapor que el entrante, por lo que se propone incrementar la presión de vapor que entra a la planta de manera tal que propicie un mayor calor latente para lograr un mayor coeficiente de emisión calorífica del vapor y mejorar la transferencia de calor durante el derretimiento.

Palabras Claves: Azufre, Derretimiento, Transferencia, Calor.

ABSTRACT

In this research, the current situation of the sulfur melting, filtering and transfer systems at the Moa Nickel Sulfur Melting Plant was analyzed to establish proposals for improvements and optimization of said systems. It was found that there was an increase in acidity and humidity that could be associated with handling, transportation of bulk sulfur, outdoor storage, and activation of microbiological action, a fundamental source of acidity. The stable behavior of iron and corundum was reflected. It was determined that, despite the melting being carried out, due to the particle size of the matter, the high speed of agitation, which favors the speed of melting, the work situations in which it is operating, do not seem favorable, since melters 1 and 2 consist of a transfer area of 180 m² each, and 3, of 330.72 m², is theoretically needed in 1 and 2; 2200 m² of area, and in number three, 10,036 m², representing 12 and 30 times more, the area used. It was evident that the heat used is not enough to melt the sulfur, 1499 kW is required in 1 and 2, and 431 kW in 3. The steam consumption in the melters should be 38008 lb/h and 50404 lb/h, this explains that more steam must be consumed than the incoming steam, so it is proposed to increase the pressure of steam entering the plant in such a way as to promote greater latent heat to achieve a higher heat emission coefficient. of steam and improve heat transfer during melting.

Keywords: Sulfur, Melting, Transfer, Heat.

ÍNDICE DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO I. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA DE LA INVESTIGACIÓN	6
1.1. Antecedentes de la investigación	6
1.2. Materias primas que se emplean en el derretimiento y filtrado de azufre	7
1.2.1. Azufre	7
1.2.2. Cal	10
1.2.3. Tierra diatomea (llamado también Kieselguhr o Diatomitas)	11
1.2.4. Vapor saturado	11
1.3. Determinación de las características químicas y físicas críticas de fundición de azufre sólido depositado en el puerto de Moa	12
1.4. Transferencia de calor.....	13
1.4.1 Naturaleza del flujo de calor	14
1.4.2 Calor latente	14
1.4.3 Calor sensible	15
1.5. Equipamiento de la Planta de Derretimiento de Azufre.....	15
1.6. Descripción del proceso tecnológico de Derretimiento y Filtrado de azufre .	22
1.7. Conclusiones del capítulo I	23
CAPÍTULO II. MATERIALES Y MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN	25
2.1. Calor necesario para derretir el azufre	25
2.2. Calor necesario para evaporar el contenido de humedad presente en el azufre	27
2.3. Determinación del área de los serpentines	28
2.4. Calor perdido al medio ambiente	35
2.4.1. El coeficiente total de transmisión de calor K.....	35
2.4.2. Área media logarítmica	36
2.5. Determinación del consumo de vapor necesario	37

2.6. Cálculo para determinar si el calor empleado es el calor suficiente para derretir el azufre	37
2.7. Conclusiones capítulo II	38
CAPÍTULO III. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	39
3.1. Análisis del comportamiento de las características químicas críticas del azufre	39
3.2. Caracterización del sistema de alimentación hacia la Planta de derretimiento y filtrado de azufre	43
3.2.1. Caracterización del sistema de alimentación de Cal	43
3.3. Caracterización del Sistema de alimentación en los Derretidores	44
3.4. Caracterización del sistema de filtrado y almacenamiento del azufre líquido	45
3.5. Propuestas de mejoras y optimización para toda la planta	45
3.6. Conclusiones del capítulo III	46
CONCLUSIONES GENERALES	47
RECOMENDACIONES	48
Bibliografía	49

INTRODUCCIÓN

El azufre elemental se produce naturalmente en depósitos dentro de la corteza terrestre y se refiere a depósitos nativos. Otra fuente de azufre elemental proviene del procesamiento de depósitos naturales ácidos. Una tercera fuente de azufre proviene de la reducción del gas dióxido de azufre. Finalmente, el azufre se puede producir como subproducto de algunos procesos metalúrgicos (Douglas K.Louie,P.Eng , 2005).

Se creía que el azufre elemental se formaba a partir de material de sulfato reducido por hidrocarburos con la ayuda de bacterias anaerobias no siendo así. En forma nativa se encuentra en domos de sal, cuencas de anhidrita o evaporita de yeso y depósitos volcánicos. Los domos de sal son estructuras verticales generalmente circulares en contorno con flancos que se hunden ligeramente. Generalmente están formados por halita (NaCl) de cristal grueso con anhidrita (CaSO₄). La caliza se hallan incrustadas gruesas capas de azufre y se agregan cristales bien desarrollados en vetas y cavidades, o como partículas en la formación porosa. Los depósitos de cuencas de evaporita son similares a los domos de sal, en el sentido de que el azufre está asociado con anhidrita o yeso. Los depósitos son de naturaleza sedimentaria y se producen en cuencas de evaporación. La deposición de azufre en los depósitos de evaporita es similar a cómo se deposita el azufre en los domos de sal (Douglas K.Louie,P.Eng , 2005).

El azufre de naturaleza volcánica se origina a partir de gases que contienen azufre que se emiten desde cráteres activos, solfataras o aguas termales. Los depósitos volcánicos generalmente ocurren en tobas, flujos de lava y rocas volcánicas similares. Los depósitos de este tipo se encuentran en todo el borde del Pacífico. Históricamente, se ha extraído azufre de depósitos volcánicos (Douglas K.Louie,P.Eng , 2005).

El uso comercial del azufre se remonta al siglo XV, donde se extraía en Sicilia. Esta fuente de azufre cobró importancia cuando en 1735 se comercializó el proceso para producir ácido sulfúrico a partir de azufre. Hasta aproximadamente 1870, la principal fuente de azufre del mundo. Se seguía extrayendo azufre de Sicilia. En aquel momento, la única tecnología disponible para producir azufre era la de minas subterráneas o a cielo abierto. Así, los consorcios sicilianos y franceses tenían prácticamente el monopolio del suministro mundial (Douglas K.Louie,P.Eng , 2005).

La creciente industrialización en todo el mundo, particularmente en los Estados Unidos, crea una demanda creciente de azufre y ácido sulfúrico que se deriva de la

quema de azufre. En 1870, se formó la Calcasieu Sulphur Mining Company para explotar el depósito de azufre de West Calcasieu ubicado en la parte sur de Louisiana, mayor depósito del mundo en su tiempo. Desafortunadamente, la geología de la zona, compuesta por capas de arcilla inestable, arenas movedizas, grava y agua, no permitía el uso de técnicas mineras tradicionales. Sin embargo, Calcasieu Sulphur Mining Company comenzaron a hundir un pozo hacia los depósitos de azufre utilizando grandes hierros que estaban destinados a sellar el agua y las arenas movedizas. Desafortunadamente, el método no tuvo éxito y se abandonó el intento de hundir el pozo en 1879. Otras compañías intentaron hundir un pozo hasta los depósitos, pero todos fracasaron y algunos intentos resultaron en la pérdida de vidas. El último intento de hundir un pozo fue realizado en 1890 por la compañía estadounidense de azufre (Douglas K.Louie,P.Eng , 2005).

Sin embargo, Herman Frasch, gran científico e ingeniero, en ese mismo año le planteó una idea a Calcasieu Sulphur Mining Company. La idea del Dr. Frasch era cavar un pozo en los depósitos de azufre. El pozo consistiría en tubos concéntricos alojados en una carcasa exterior. La tubería exterior llevaría agua sobrecalentada hasta el depósito de azufre. Al nivel del azufre, la tubería estaba perforada, lo que permitió que el agua caliente se filtrara en la caliza porosa y se derritiera el azufre circundante. El azufre fundido se acumuló en un charco en el fondo del pozo. Se bombeó aire comprimido hacia abajo por la tubería central que luego obligó al azufre fundido a fluir por la tubería intermedia hasta la superficie (Douglas K.Louie,P.Eng , 2005).

Este método es conocido como proceso Frasch en honor a su inventor y la mayor cantidad de azufre elemental del mundo se ha obtenido por dicho proceso a partir de las piedras calizas porosas que lo contienen. Cabe destacar que el azufre así obtenido es muy puro (pureza del 99,5-99,9%) y no contiene impurezas de Se, Te o As.

Por otra parte, existen otros métodos u otras maneras de obtener azufre, ejemplo de ello es mediante el proceso Claus. En este se recupera el azufre del sulfuro de hidrógeno gaseoso que se encuentra en el gas natural crudo y de los gases subproductos que contienen sulfuro de hidrógeno derivado de la refinación del petróleo crudo y otros procesos industriales.

Al fundir el azufre, se obtiene un líquido que fluye con facilidad formado por moléculas de S₈. Sin embargo, si se calienta por encima de 151 grados Celsius, el color se torna marrón algo rojizo, y se incrementa la viscosidad. Este comportamiento se debe a la

ruptura de los anillos y la formación de largas cadenas de átomos de azufre, que pueden alcanzar varios miles de átomos de longitud, estos se enredan entre sí disminuyendo la fluidez del líquido. El máximo de la viscosidad se alcanza en torno a los 200 °C. Enfriando rápidamente este líquido viscoso se obtiene una masa elástica, de consistencia similar a la de la goma, denominada «azufre plástico» (azufre γ) formada por cadenas que no han tenido tiempo de reordenarse para formar moléculas de S_8 ; transcurrido cierto tiempo la masa pierde su elasticidad cristalizando en el sistema rómbico. Estudios realizados con rayos X muestran que esta forma deforme puede estar constituida por moléculas de S_8 con estructura de hélice espiral. En estado vapor también forma moléculas de S_8 , pero a 780 °C ya se alcanza el equilibrio con moléculas diatómicas y por encima de aproximadamente 1800 °C la disociación es completa y se encuentran átomos de azufre. (<https://es.wikipedia.org/wiki/Azufre>, s.f.)

Este elemento es un material ampliamente usado en la industria, su producción anual a nivel mundial excede los 60 millones de toneladas. Entre la amplia gama de materiales producidos con azufre se encuentran fertilizantes, pinturas, pesticidas, fármacos, entre muchos otros. El azufre se presenta en el comercio o bien en forma de polvo o bien en forma de cilindros gruesos (azufre en cañón), que se obtienen por solidificación del fundido en moldes de madera. Por condensación del vapor sobre cámaras de mucha superficie, cerradas, se forma un polvo muy fino llamado flor de azufre. También se presenta en forma de barras finas, provistas de mecha de algodón para facilitar su combustión con producción de SO_2 , para la fumigación de recipientes destinados a la fabricación y conservación de vinos y cervezas. El azufre inusualmente aparece como parte del producto final en muchas de sus aplicaciones, especialmente en aquellas que lo requieren en forma de ácido sulfúrico, el cual representa entre el ochenta y noventa por ciento del azufre consumido a nivel mundial. Se por lo que se afirma que 90 % del S elemental se destina a la fabricación de SO_2 que a su vez se destina mayoritariamente a la síntesis de ácido sulfúrico, materia prima en la elaboración de fertilizantes ($SO_2 \rightarrow SO_3 \rightarrow H_2SO_4 \rightarrow$ fertilizantes). El resto (10%) del S elemental se destina a la síntesis de CS_2 , a la vulcanización del caucho, a la obtención de fungicidas, insecticidas, pólvora y productos farmacéuticos.

En 2021, Cuba importó \$30,1M en Azufre, convirtiéndose en el importador número 2 de Azufre en el mundo. En el mismo año, el azufre fue el producto número 19 más

importado en Cuba. Cuba importa este producto principalmente de: Canadá (\$30,1M), Alemania (\$2,11k), y España (\$2,05k).

La Empresa Mixta Moa Nickel SA, pertenece al Grupo Empresarial Cuba níquel, ubicada en Moa, Provincia de Holguín. El objeto social es producir y comercializar sulfuros mixtos de níquel y cobalto. Para ello, importa todos los suministros necesarios, entre los que se encuentra el azufre brillante para la obtención de ácido sulfúrico y H_2S , reactivos limitantes de la reacción de lixiviación y precipitación de los sulfuros del proceso HPAL.

Sin duda alguna, Cuba se ha convertido en uno de los mayores importadores de azufre a nivel mundial. Este producto una vez procesado en la Planta de Derretimiento de Azufre, es trasladado en su estado líquido mediante pailas hacia la Planta de Ácido sulfúrico para la generación de este ácido con un 98,5 % de pureza.

En esta planta de ácido sulfúrico, a finales de junio del 2015, se realizó la instalación de un tercer tren. Con la terminación de la misma no es necesario importar este producto. Esta nueva planta ofrece la oportunidad de desplazar totalmente la compra de ácido importado más costoso proveniente de terceros y optimizar la relación ácido-mineral para mejorar la extracción de los metales y la producción de sulfuros mixtos.

La capacidad de la nueva planta sería aproximadamente 1.6 veces la producción actual que combinada con la producción de la vieja planta cubriría en un 100% la demanda del proceso y permitiría comercializar el resto. Producir más ácido conlleva a un incremento en las importaciones de azufre, lo que incluye la recepción y manipulación de azufre, las instalaciones de derretimiento y transportación y el equipamiento requerido para satisfacer las crecientes demandas de esta materia prima. Esto obliga a la expansión de la planta de derretimiento del área portuaria. Bajo estas condiciones se ha creado un tercer derretidor de mayor capacidad, pero aun así la capacidad de producción esta su diseñada, lo que significa que hay que adaptar el proceso a un mayor volumen.

Se tiene pensado derribar el derretidor 2, y diseñar otro derretidor de mayor capacidad para así incrementar más la productividad y satisfacer la demanda establecida. Teniendo como problema, la necesidad de obtener una caracterización del sistema derretimiento de azufre en la empresa Moa Nickel S.A, así como el análisis de las condiciones actuales de dichos sistemas, lo cual impide establecer una serie de propuestas de mejoras y optimización en dichos procesos.

Objeto de estudio: azufre brillante para la producción de ácido sulfúrico en Moa Nickel S.A.

Campo de acción: transferencia de calor para el derretimiento del azufre brillante para la producción de ácido sulfúrico en Moa Nickel S.A.

Objetivo general: caracterizar las operaciones de derretimiento y filtrado de azufre que permita la optimización de los sistemas de derretimiento de azufre brillante para la producción de ácido sulfúrico en la empresa Moa Nickel S.A.

Objetivos específicos:

1. Determinar las características químicas y físicas del azufre sólido, las cuales intervienen en el procesamiento de la fundición del mismo.
2. Determinar las características y las condiciones de trabajo en las que están operando los equipos necesarios para llevar a cabo el derretimiento del azufre.
3. Proponer un sistema de mejoras para la planta a partir de las condiciones reales de los equipos y las características de la materia prima.

Hipótesis: si se realiza una caracterización de los procesos que interviene en el sistema de derretimiento y filtrado del azufre brillante para la producción de ácido sulfúrico, se podrán realizar recomendaciones que permitan optimizar las operaciones en la Planta de derretimiento de azufre, en la empresa Moa Nickel S.A

CAPITULO I. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA DE LA INVESTIGACIÓN

En este capítulo se enumeran una serie de estudios realizados previamente a la investigación, que sirven como referencia para el logro de los objetivos, adicionalmente se presentan las bases teóricas que permiten una mejor comprensión del tema en estudio.

1.1. Antecedentes de la investigación

(Rodriguez, Swann, enero 2014), en su investigación diseñó un sistema de fundición y almacenamiento de azufre sólido proveniente de los mejoradores de crudo en Morón, estado de Carabobo para así alimentar a la nueva planta de ácido sulfúrico. Con la finalidad de lograr su investigación el mismo determinó las características químicas y físicas críticas en el diseño de un sistema de fundición, las cuales son: la pureza del azufre, el contenido de humedad, la acidez, la presencia de ceniza y el tamaño de partículas.

Por su parte (Chávez, L, 1976), realiza un análisis de las principales deficiencias presentadas en el transporte de azufre líquido, para lo cual realizó un estudio relacionado con el consumo de vapor en las líneas de transferencia de azufre y vapor; este trabajo fue ejecutado para un solo derretidor y tres tanques para el almacenamiento del azufre líquido. Esta investigación muestra un procedimiento de cálculo elaborado de acuerdo con Kern (1969) para determinar los consumos de vapor en las diferentes líneas y tanques incluyendo también al derretidor; se efectuó una valoración económica profunda pero no hace referencia al problema ambiental ocasionado por el azufre en esa área; el trabajo muestra además imágenes impresionantes sobre el deterioro de las líneas producto de las continuas averías.

En la investigación de (Vázquez Navarro, Nelson A, 2017-2018), se realizó una actualización del balance de vapor de la Empresa Moa Nickel S.A, con la incorporación de la Nueva Planta de Ácido. Se determinó que las principales deficiencias con el balance de vapor actual están relacionadas con ausencia de medidores de flujo, incorrecta ubicación y desajustes de algunos de estos. Se utilizaron los balances de masa y energía como herramienta para la determinación de los flujos de vapor consumidos y generados, considerando condiciones adiabáticas. Sólo se analizaron las partes del proceso que requieren vapor de agua de forma continua, excepto algunos equipos para los cuales no se disponían de los datos necesarios para realizar

los cálculos. Las plantas escogidas fueron Lixiviación, Precipitación de Sulfuros, Hidrógeno, Ácido Sulfúrico y Derretimiento de Azufre. De forma general fueron obtenidos valores aceptables excepto para el vapor de 0 psi utilizado en Lixiviación y el vapor de 85 psi utilizado en derretimiento de azufre. Para los valores cuya diferencia con el valor reportado fue mayor del 20 %, se expuso la posible causa por la que se obtuvo esta diferencia, pues en la planta de Derretimiento de Azufre el flujo de vapor de 85 psi consumido determinado por cálculo es menor que el reportado en un 61 %, ya que para los cálculos sólo fue considerado el derretidor por falta de datos; sin embargo, también se consume este vapor en los tanques de azufre, en las líneas donde circula azufre y en los filtros. En esta investigación se tiene el inconveniente que no se considera el calor que se pierde por las paredes de los derretidores.

1.2. Materias primas que se emplean en el derretimiento y filtrado de azufre

1.2.1. Azufre

El azufre es un elemento químico de símbolo S y en su forma natural es sólido y de color amarillo, poco conductor del calor y la electricidad. Se funde a 113 °C (o algo mayor dependiendo de la forma alotrópica) y se vaporiza a 444,6 °C. Más del 99% del Azufre elemental que se comercializa se vende crudo. El azufre brillante es 99,5% puro y contiene menos del 0,1% de Carbono. El azufre oscuro puede contener hasta 1% de materia carbonosa, aunque los niveles entre 0,25 - 0,3% son los estándares. Ambos tipos de azufre brillante y oscuro no contienen arsénico, selenio ni telurio y son utilizados para la producción de ácido sulfúrico (H_2SO_4) y para otros usos. El azufre se comercializa generalmente a granel o en cisternas dependiendo de su estado físico.

Es una de las materias primas más importantes de la industria química. Sus usos radican principalmente en la aplicación de sus derivados (ácido sulfúrico) en muchos productos químicos y procesos industriales y es particularmente importante en la fabricación de fertilizantes fosfatados, el uso final más importante para el azufre. La gran relevancia del azufre en las economías industriales y su facilidad de transporte han hecho que este producto sea de gran interés internacional. A diferencia de otros productos químicos, el azufre no se produce intencionalmente; se obtiene como un subproducto de las operaciones tales como la refinación del petróleo, en la recuperación de arenas de alquitrán, procesamiento de petróleo pesado y gas natural,

y de coque y las plantas metalúrgicas. El azufre elemental en estado fundido es la materia prima más común para la producción de ácido sulfúrico. Cuando se utiliza azufre sólido, inicialmente se funde, luego se eliminan las impurezas (si es necesario) y finalmente se alimenta a un quemador de azufre, en el que se oxida con aire seco a presión.

Una ventaja importante de usar azufre como materia prima es que hay una ganancia neta de energía en la producción del ácido. Para muchos productores de ácido esta energía es necesaria para otros procesos y su valor puede hacer que la producción sea más económica (Rodríguez, Swann, enero 2014).

Propiedades físicas y térmicas del azufre

- Peso atómico: 32.065 u
- Densidad en fase sólida: 1960 - 2007 Kg/m³
- Densidad en fase líquida: 1800 -1900 Kg/m³
- Temperatura de fusión: 112 -119 °C. (385 – 392 K)
- Temperatura de ebullición 446 °C. (720 K)
- Temperatura de inflamación: 188 °C. (461 K)

El azufre tiene dos formas fundamentales de cristalización: romboédrica y monoclinica, de ahí la variación de sus características. La viscosidad del azufre líquido varía con la temperatura y por encima de 160 °C se torna una masa viscosa de muy baja fluidez. Este cambio de propiedad por la acción del calor se debe a transformaciones en la estructura interna del mismo. Este efecto de la energía en forma de calor en la viscosidad del azufre es de gran importancia en el almacenaje y transporte de este en estado líquido.

Por debajo de 95,3 °C la fase estable son cristales rómbicos o α - azufre, entre 95,3 y 119 °C, la fase termodinámicamente estable son los cristales monoclinicos o β - azufre. Tanto el azufre rómbico como el monoclinico están formados por anillos de ocho átomos de azufre. El ciclo octazufre o λ - azufre se forma a partir de la temperatura de fusión, por encima de 119 °C. Es un líquido amarillo transparente formado por anillos de ocho átomos. Al aumentar la temperatura aparece el azufre polimérico o μ - azufre, que predomina por encima de 159 °C; es de color marrón oscuro, muy viscoso y tiene una estructura de largas cadenas helicoidales. La viscosidad alcanza el máximo a 180 °C. El azufre polimérico es insoluble en sulfuro

de carbono. A 444,6 °C el azufre entra en ebullición. El azufre plástico, denominado también γ - azufre, se produce cuando el azufre fundido en el punto de ebullición normal o cerca de este es enfriado al estado sólido. En (Figura 1), se representa la transición entre las diferentes estructuras del azufre (Trejo Cuevas, Oscar, Mayo 2006).

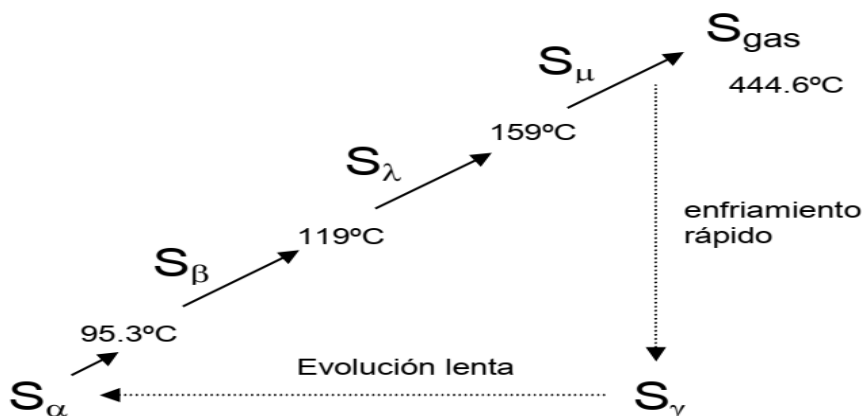


Figura 1. Transición entre las diferentes estructuras del azufre.

En el (

Cuadro 1), se registran los valores de calor específico del azufre.

Cuadro 1. Valores de calor específico del azufre a diferentes temperaturas.

CALOR ESPECÍFICO DEL AZUFRE (kcal/kg °C)				
T (°F)	T (°C)	S (Rómbico)	S (Monoclínico)	S (Líquido)
80	26.7	0.169	0.177	-
100	37.8	0.171	0.179	-
120	48.9	0.173	0.181	-
140	60	0.175	0.184	-
160	71.1	0.177	0.186	-
180	82.2	0.18	0.188	-
200	93.3	0.182	0.191	-
238	114.4	-	-	0.238
250	121.1	-	-	0.24
270	132.2	-	-	0.244
290	143.3	-	-	0.25
300	148.9	-	-	0.256

Aplicaciones y usos del azufre

Un 75% del azufre elemental que se comercializa actualmente en el mundo se utiliza para la producción de ácido sulfúrico (H_2SO_4) y este a su vez tiene varios usos como

en el proceso de lixiviación ácida, (ejemplo Moa Nickel S.A.), producción de fertilizantes, etc. El azufre también se usa en la fabricación de materiales colorantes, explosivos, fuegos artificiales, cerillas (fósforos). Se aplica como plaguicida en la agricultura, para vulcanizar el caucho y otros usos. En la Empresa Moa Nickel S.A el azufre se utiliza en la producción de ácido sulfúrico (H_2SO_4) y ácido sulfhídrico (H_2S).

Transportación y manipulación.

El azufre se puede transportar en estado líquido o sólido. En la transportación y manipulación del azufre deben tenerse en cuenta varios factores:

- Impacto sobre el medio ambiente.
- Mantener alta calidad y pureza en el producto
- Efectos sobre el equipamiento.
- Costo.

El producto líquido evita un nuevo derretimiento y tiene menor impacto ambiental, pero requiere instalaciones especiales, propias de países desarrollados. El producto sólido tiene un mayor impacto ambiental y es susceptible a pérdidas, sin embargo, se manipula en instalaciones convencionales, se puede almacenar en grandes cantidades y es preferido en los países en desarrollo. El azufre atendiendo a su baja temperatura de ignición, al posible desprendimiento de H_2S residual y a los gases productos de su combustión (SO_2 , SO_3), es un producto de alto riesgo en la industria.

1.2.2. Cal

La cal (del latín *calx*) es una sustancia alcalina constituida por óxido de calcio (CaO), de color blanco o blanco grisáceo, que al contacto del agua se hidrata o apaga, con desprendimiento de calor, y mezclada con arena forma una argamasa o mortero de cal. También los alquimistas llamaban cal a cualquier óxido metálico o escoria.

Otro compuesto llamado cal es el óxido de calcio y magnesio o dolomía calcinada ($CaMgO_2$). Por ello se dice que la cal es un término que designa todas las formas físicas en las que puede aparecer el óxido de calcio (CaO) y se obtiene como resultado de la calcinación de las rocas calizas o dolomías (<http://www.es.wikipedia.org/Óxido de Calcio, s.f.>).

Al entrar en contacto con los gases, la cal reacciona adsorbiendo los contaminantes sobre su superficie. La cal está específicamente indicada, por su gran afinidad, para

el tratamiento de gases ácidos (Flúor, Cloro y Azufre). La capacidad de neutralización y su gran reactividad hacen de la cal viva (Óxido de Calcio) y la cal apagada (hidróxido cálcico), un producto perfecto en cualquiera de sus presentaciones (<http://www.calcinor.com/es/actualidad/reviews-producto/cal-tratamiento-gases>).

1.2.3. Tierra diatomea (llamado también Kieselguhr o Diatomitas)

Roca silíceo, sedimentaria de origen biogénico, principalmente está constituida por restos (esqueletos) fosilizados de las frústulas de las diatomeas, presentando diversos grados de consolidación.

Su uso más importante y espectacular es como ayudante de filtración para la clarificación y purificación de una gran variedad de líquidos en el proceso químico, metalúrgico, alimentos, fármacos, bebidas, petróleo y otras industrias. Las partículas de un producto de diatomitas molidas permiten, en el proceso de filtración, la formación de una torta de poros abiertos en el cual las impurezas o partículas suspendidas son capturadas, proporcionando de esta manera un filtrado bien clarificado libre de tales impurezas. (<http://www.gdo.mx/minería/Diatomita-ENE>, 2020).

1.2.4. Vapor saturado

Vapor: sustancia en estado gaseoso que se encuentra a una temperatura inferior a su temperatura crítica y que se puede condensar por enfriamiento a presión constante o por compresión a temperatura constante (Vázquez Navarro, Nelson A, 2017-2018).

Vapor saturado: es aquella sustancia pura en estado gaseoso que está a una presión igual a la presión de vapor a la temperatura en cuestión; por lo tanto, es un vapor que se encuentra en contacto y en equilibrio con su fase líquida en las mismas condiciones de temperatura y presión. La temperatura y la presión a la que coexisten ambas fases en equilibrio se denominan temperatura y presión de saturación (Vázquez Navarro, Nelson A, 2017-2018).

Este vapor saturado que se obtiene en la planta de Sacado situada en el Puerto de Moa es un vapor de 85 a 100 psi, suministrado desde las turbinas de Lixiviación, a través de un conducto de 8" de diámetro (203 mm), en donde posteriormente se emplea para derretir el azufre sólido y lograr mantenerlo en estado líquido evitando así su solidificación.

1.3. Determinación de las características químicas y físicas críticas de fundición de azufre sólido depositado en el puerto de Moa

En la investigación realizada de los diferentes sistemas para la producción de ácido sulfúrico y en las literaturas técnicas se evidencia que las características que ejercen un mayor impacto en el proceso son las siguientes:

- **Pureza del azufre:** la calidad o pureza del azufre puede ser expresada de diferentes maneras, la más común es la que hace referencia a la cantidad de contenido de materia orgánica: Ultra Brillante, contenido máximo de materia orgánica igual a 0,02%, la garantía de pureza es del 99,5%; Brillante, contenido máximo de materia orgánica igual a 0,04% y Oscuro, contenido máximo de materia orgánica igual a 0,2%. En la mayoría de los procesos para la producción de ácido sulfúrico se debe tener un mínimo de pureza del 99,9%.
- **Contenido de humedad:** el contenido de humedad del azufre sólido debe estar por debajo de 0,05% en peso debido a que la humedad puede causar formación de espuma dentro del proceso de fundición, disminuyendo la capacidad de transferencia de calor en el equipo y además está espuma, formada mayormente de ácidos, acelera el proceso de corrosión en la parte interna de los equipos afectando el proceso de fundición y la rentabilidad de toda la unidad debido al incremento de gastos por mantenimiento. Otro factor importante asociado al contenido de agua es el aumento de la carga térmica que se debe incorporar al azufre para fundirlo, datos experimentales reflejan que, por cada porcentaje de agua presente, la carga térmica aumenta en un 20% generando gastos adicionales en la alimentación de vapor al sistema de fundición.
- **Acidez:** el porcentaje de acidez debe estar por debajo de 0,02% en peso, mayores valores de acidez en el sistema de fundición promueven la corrosión debido a la formación de ácidos dentro del equipo, para evitar esto generalmente se adiciona cal, cuya función principal es disminuir la acidez en todo el sistema.
- **Ceniza:** Las cenizas presentes en el azufre sólido pueden obstruir con el paso del tiempo las tuberías disminuyendo el flujo en el sistema y eventualmente bloqueando éste por completo, además aquellas que pasan a través de los quemadores de azufre pueden llegar hasta el lecho catalítico, acumulándose y originando caídas de presión lo que disminuye la vida útil del catalizador.

Generalmente se minimiza la presencia de cenizas en el sistema con el uso de filtros antes de la entrada en el horno de combustión.

- **Tamaño de partícula:** en la mayoría de los sistemas de fundición de azufre, el sistema de alimentación se diseña considerando uno o varios filtros a la entrada del equipo debido principalmente a factores de seguridad, con lo que se quiere evitar el ingreso de materiales extraños al sistema e inclusive, en procesos de gran tamaño, prevenir accidentes personales. Se debe destacar que partículas de azufre de gran tamaño no podrán ingresar al sistema, por lo que esta característica se debe controlar en la unidad de recuperación de azufre. Para efectos del diseño se consideran los valores promedios calculados experimentalmente.

A continuación, se presentan los rangos permitidos en las especificaciones del azufre en la alimentación de una planta de ácido sulfúrico.

Cuadro 2. Especificaciones del azufre sólido.

Parámetros	U.M.	Valor	Nivel
S (Azufre Elemental)	% en peso	99.9	Max
Ceniza	% en peso	0.01	Max
C (Carbón)	% en peso	0.02	Max
Humedad	% en peso	0.05	Max
Ácido sulfúrico (Acidez)	% en peso	0.02	Max
Cloruro	% en peso	0.01	Max
Fe	% en peso	0.008	Max
As (Arsénico)	ppm	No detectado	(menor de 0.25 ppm)
Se (Selenio)	ppm	No detectado	(menor de 0.25 ppm)
Te (Telurio)	ppm	No detectado	(menor de 0.25 ppm)
Tamaño de partículas	mm	8 mm	Max (pellets, Prilled, Flake)

Fuente: (d-csc-02-manual-de-operaciones-planta-de-derretimiento-y-filtrado-de-azufre-vers.pdf)

1.4. Transferencia de calor

Prácticamente en todas las operaciones químicas interviene la producción o absorción de energía en forma de calor. Por lo tanto, las leyes que rigen la transferencia de calor y el tipo de aparatos, cuyo fin principal es el control del flujo de calor, tiene una gran importancia (Rodríguez, Swann, enero 2014).

Calor (Q): energía que fluye como resultado de una diferencia de temperatura entre el sistema y sus alrededores; si el sistema recibe calor, éste se considerará positivo (Vázquez Navarro, Nelson A, 2017-2018).

1.4.1 Naturaleza del flujo de calor

Cuando dos objetos que están a temperaturas diferentes se ponen en contacto térmico, el calor fluye desde el objeto de temperatura más elevada hacia el de temperatura más baja. El flujo neto se produce siempre en el sentido de la temperatura decreciente. Los mecanismos por los que fluye el calor son tres: conducción, convección y radiación (Rodríguez, Swann, enero 2014).

Convección: la convección se refiere al flujo de calor asociado con el movimiento de un fluido, tal como cuando el aire caliente de un horno entra a una habitación, o a la transferencia de calor de una superficie caliente a un fluido en movimiento. El segundo significado es más importante para las operaciones unitarias, de forma que incluye la transferencia de calor a partir de paredes metálicas, partículas sólidas y superficies líquidas. Por lo general, el flujo convectivo por unidad de aire es proporcional a la diferencia entre la temperatura de la superficie y la temperatura del fluido.

Convección natural y forzada: cuando las corrientes en un fluido son consecuencia de las fuerzas de flotación generadas por diferencias de densidad, que a su vez se originan por gradientes de temperatura en la masa del fluido, la acción recibe el nombre de convección natural. Cuando las corrientes se deben a un dispositivo mecánico, tal como una bomba o un agitador, el flujo es independiente de las diferencias de densidad y recibe el nombre de convección forzada. Las fuerzas de flotación también existen en la convección forzada, pero por lo general sólo tienen un pequeño efecto (Rodríguez, Swann, enero 2014).

1.4.2 Calor latente

Es la energía absorbida por las sustancias al cambiar de estado, de sólido a líquido (calor latente de fusión) o de líquido a gaseoso (calor latente de vaporización). Al cambiar de gaseoso a líquido y de líquido a sólido se devuelve la misma cantidad de energía. (García Andrade, Laura Rebeca; Mejías Meré, Jaime Ab; Silva achardo, Jesús Salvador, Diciembre del 2008.)

La cantidad de calor requerida por una sustancia para fundirse es la misma que cede cuando se solidifica. Por tanto, respecto a una sustancia, el calor latente de fusión es igual al calor latente de solidificación. (Ortiz Cortéz, Luz María)

El calor latente de fusión: el calor latente de fusión es una propiedad característica de cada sustancia pues según el material de que esté hecho el sólido requerirá cierta cantidad de calor para fundirse. Por definición el calor latente de fusión de una sustancia es la cantidad de calor que requiere ésta para cambiar 1 gramo de sólido a 1 g de líquido sin variar su temperatura. (Ortiz Cortéz, Luz María)

Calor latente de vaporización: a una presión determinada todo líquido calentado hierve a una temperatura fija que constituye su punto de ebullición. Éste se mantiene constante independientemente del calor suministrado al líquido, pues si se le aplica mayor cantidad de calor, habrá mayor desprendimiento de burbujas sin cambio en la temperatura del mismo. Al medir la temperatura del líquido en ebullición y la del vapor se observa que ambos estados tienen la misma temperatura, es decir, están en equilibrio termodinámico. A presión normal (1 atm= 760 mm de Hg) el agua ebulle y el vapor se condensa a 100°C, a esta temperatura se le da el nombre de punto de ebullición del agua. Si se desea que el agua pase de líquido a vapor o viceversa sin variar su temperatura necesita un intercambio de 540 calorías por cada gramo (Ortiz Cortéz, Luz María).

Este calor necesario para cambiar de estado sin variar su temperatura se denomina calor latente de vaporización del agua o calor de vaporización simplemente. Por definición: el calor de vaporización de una sustancia es la cantidad de calor que requiere para cambiar 1 gramo de líquido en ebullición a 1 g de vapor, manteniendo constante su temperatura cambio en la temperatura del mismo (Ortiz Cortéz, Luz María).

1.4.3 Calor sensible

Es aquel que, aplicado a una sustancia hace subir su temperatura, pero sin producir un cambio de estado (García Andrade , Laura Rebeca; Mejías Meré , Jaime Ab; Silva achardo, Jesús Salvador , Diciembre del 2008.).

1.5. Equipamiento de la Planta de Derretimiento de Azufre

Derretidores 534-TK-2A/B

Tanque derretidor de azufre de 6 metros de diámetro y 5 metros de altura construido de acero al carbono y recubierto interiormente con ladrillos antiácidos. Posee 9 serpentines de tubos de 2" de diámetro dispuesto convenientemente para formar un anillo. Cada serpentín tiene aproximadamente 20 m² de área de transferencia y están montados directamente en el fondo. En el centro posee un agitador de paletas y en un lateral una bomba vertical sumergida con base en la tapa del derretidor. El derretidor se encuentra totalmente sobre la superficie del terreno y está protegido exteriormente con pintura epoxídica.

Derretidor 1534-TK-01

Tanque recipiente rectangular construido de cemento recubierto con ladrillos antiácido de dimensiones de (3.5 x 4.2 x 12) metros con una capacidad de 150 metros cúbicos, poseen 21 serpentines de 2 pulgs dispuestos de forma rectangular, entre los cuales hay instalados dos agitadores de paletas en diferentes compartimientos. El paso al tanque de azufre sucio se realiza por un tabique situado en el extremo norte por la parte superior del recipiente.

Piscina de Azufre Sucio 1534-TK-02

Tanque recipiente rectangular construido de cemento recubierto con ladrillos antiácido de dimensiones de (3.5 x 4.2 x 17) metros con una capacidad de 250 metros cúbicos, poseen 16 serpentines de 2 pulgadas dispuestos de forma rectangular, entre los cuales hay instalados tres agitadores de paletas en diferentes compartimientos. En el extremo este de recipiente se encuentran instaladas 3 bombas centrífugas para bombear el azufre a los filtros o al tanque de precapa.

Piscina de Azufre Precapa 1534-TK-03

Recipiente rectangular construido de cemento recubierto con ladrillos antiácido de dimensiones de (3.5 x 4.2 x 4.2) metros con una capacidad de 62 metros cúbicos, poseen 2 serpentines de 2 pulgs dispuestos de forma rectangular, entre los cuales hay instalados un agitador de paletas y dos bombas centrífugas para bombear la precapa hacia los filtros. El objetivo de este recipiente es de mezclar tierra diatomea y azufre para el pre revestimiento de los filtros con el medio filtrante.

Filtro de Azufre 1534 - FL – 02 A/B/C

Características:

- Filtro de Hojas SULPHURNET.COM
- Modelo: 52-1800
- Área de filtración :52 m²
- Volumen de la torta :1785 Lts
- Temperatura máxima tanque: 165 °C
- Presión máxima en el tanque: 6.5 bar
- Tanque y camisa de vapor: Acero al carbono
- Presión máxima permitida camisa de vapor :5.5 Bar
- Presión máxima Diferencial a través de las mallas: 3.5 Bar
- Platos Filtrantes: Acero Inoxidable Junta de cubierta: Viton

El filtro Sulphurnet.com cuenta con un tanque retractable montado horizontalmente moviéndose en carretillas sobre un riel, se abre lentamente con un cilindro hidráulico. Una tapa fija, montada en la armazón, con todas las principales conexiones tales como entrada del producto, salida del filtrado y drenaje. Un colector de filtrado con un extremo conectado a la tapa fija y el otro sostenido por el tanque del filtro por medio de una rueda, con conexiones para los platos filtrantes. Los platos filtrantes son 17 construidos de 3 capas de mallas metálicas.

Tanques de almacenaje de azufre líquido. 534 – TK – 8 A/B

Es un tanque cilíndrico vertical fabricado de Acero al Carbono con revestimiento térmico exterior con capacidad para almacenar 4500 (534-TK- 8B) toneladas de azufre líquido y el 534-TK – 8A de 4500 toneladas. Posee un diámetro de 17.764 m y una altura de 9.870 m (534 - TK – 8B). Constan de trece serpentines en el fondo alimentados con vapor para mantener la temperatura del azufre derretido. También posee 12 serpentines en el techo por la parte externa para mantener el techo caliente y evitar el condensado de los vapores de agua. La línea de entrada es por el techo y es enchaquetada de diámetro 6 x 8" mientras que la descarga es por el lateral aproximadamente a 300 mm, posee además una mocheta adicional para caso de avería. Su función es almacena el azufre derretido para ser bombeado hacia las plantas de Ácido y H₂S.

Bombas de los derretidores 534 – PU – 2 A/B

Características:

- Motor: 460 V, 60 Hz, tres fases. Potencia: 17 kW.

- Intensidad: 31 A. Velocidad: 1750 rpm.
- Flujo: 45 m³/h. Diámetro de descarga: 3”
- Marca: AxPo – 45/54 BK. País: URSS. Lubricante: AD-3.

Bomba centrífuga vertical de impelente sumergido abierto. Motor eléctrico asíncrono de

acoplamiento directo. El eje y el tubo de descarga con camisa a vapor. Su función es Transferir el azufre líquido desde el foso del derretidor hacia los tanques de almacenaje.

Alimentador de azufre del Derretidor 1. 534 – FD – 1 A/1B

Características:

- Motor: 460 V, 60 Hz, tres fases. Potencia: 0.75 kW.
- Intensidad: 1.95 A. Velocidad: 1100 rpm.
- Correa: 7000 mm x 400 m País: España.

Es un transportador de banda que posee el motor reductor de 1 kW acoplado directamente al eje de la tambora motriz, el motor reductor es un sistema de transmisión corona – sinfín lubricado de por vida con un aceite especial. Posee 5 pares de rodillos guías y dos tensores en la parte superior. La tambora conducida posee un mecanismo para tensión y alineación de la banda. Su función es alimentar azufre sólido granulado al derretidor principal desde la tolva.

Alimentador de azufre al Derretidor 2. 534 - FD - 1A/B

Características:

- Motor: 460 V, 60 Hz, tres fases. Potencia: 0.75 kW.
- Intensidad: 1.15 A. Velocidad: 1100 rpm.
- Correa: 7000 mm x 400 m. País: URSS. Tipo: PL - 30

Es un transportador que posee un motor reductor acoplado por engranaje al eje de la tambora motriz. El motor reductor es de corona sinfín y engranaje de dos escalones lubricados con aceite ALPHA 220. Posee 5 pares de rodillos guías y dos tensores en la parte superior. La tambora conducida posee un mecanismo de regulación para el tensado y la alineación. Su función alimentar azufre sólido granulado al derretidor desde la tolva

Agitadores del Derretidor. 534 – AG – 2 A/B

Características:

- Marca: EKATO. Motor. Tipo: ANGA – 250 ME – 04 M.
- Potencia: 55 kW. Intensidad: 91 A.
- Velocidad: 1765 rpm. Diferencia de potencial: 460 V.
- Otros: 3 fases, 60 Hz. Protección: IP – 55.

Agitador de paletas. Los reductores son de tres escalones de engranajes helicoidales paralelos. El motor está acoplado al reductor mediante coupling flexible de amortiguadores de goma. El eje de salida coincide en centro con el eje del agitador, el cual se acopla mediante chaveta. La lubricación es por inmersión y se recomienda aceite sintético 320. Posee indicador visual de nivel y una caja para la expansión del aceite por las variaciones de la temperatura, que, además sirve para compensar las pérdidas de aceite. Su función es agitar la masa de azufre líquido a la que se le adiciona el sólido para facilitar la transferencia de calor para el derretimiento.

Transportadores de azufre 534 – CO – 1 A/B

Características:

- Marca: TAIM. País: España.
- Longitud de banda: 66.5 m. Ancho de banda: 0.650 m.
- Angulo de inclinación: 20°. Motor: FLENDER, tres fases, 460 V, 60 Hz.
- Potencia: 11 kW. Intensidad: 18.4 A. Velocidad: 1800 rpm.

Transportador de bandas C-2 B-650 accionado por un motor reductor RAO 100/D de $i=93$ de tres escalones de engranajes paralelos de dientes oblicuos. El acoplamiento motor – reductor está compuesto por un acoplador flexible de goma T– 5 36/44 y un acoplador hidráulico centrífugo TJ – 11.5 42/38 que le permite tomar la carga de forma moderada a medida que se equilibra la velocidad de los semiacopladores. El acoplamiento reductor – tambora motriz es rígido. Posee 23 estaciones superiores con tres rodillos lisos cada una de diámetro (133 x 250) mm de longitud dispuestos a 30°. Posee además 10 rodillos inferiores lisos de 133 mm de diámetro por 750 mm de longitud. Está equipado también con 10 estaciones de carga con tres rodillos de impacto RAN cada una. Su función es transportar el azufre desde la primera tolva, hasta la tolva que alimenta al transportador del derretidor.

Transportador de azufre 1534 – CO – 1 A

Características:

- Longitud de banda: 52.5 m. Ancho de banda: 0.650 m.
- Angulo de inclinación: 20 °. Motor: NORD-SK9072 AZDR-132
- Potencia: 5.5 kW. Intensidad: 18.4 A. Velocidad: 1800 rpm.

Transportador de bandas accionado por un motor reductor NORD-SK9072 AZDR-132/S4 relación 1/246 velocidad salida 7.3 rpm El acoplamiento motor – reductor está compuesto por un acoplador flexible de goma T-5 36/44 y un acoplador hidráulico centrífugo TJ – 11.5 42/38 que le permite tomar la carga de forma moderada a medida que se equilibra la velocidad de los semiacopladores. El acoplamiento reductor – tambora motriz es rígido. Posee 23 estaciones superiores con tres rodillos lisos cada una de diámetro (133 x 250) mm de longitud dispuestos a 30 °. Posee además 10 rodillos inferiores lisos de 133 mm de diámetro por 750 mm de longitud. Está equipado también con 10 estaciones de carga con tres rodillos de impacto RAN cada una. Su función es transportar el azufre desde la tolva hasta el Derretidor.

Bombas de azufre sucio 1534 – PU – 4A/B/C

Bombas: Se denominan bombas las máquinas hidráulicas que transforman la energía mecánica de un motor en energía cinética, aumentando la presión del fluido. El transporte del líquido se basa en la diferencia de presiones entre la bomba y la tubería.

Características:

- Motor: 460 V, 60 Hz, tres fases. Potencia: 31.6 kW.
- Velocidad: 1750 rpm. Flujo: 17 m³/h. a H-53 m
- Marca: FRIATEC AG País: Alemania.

Bombas de azufre precapa 1534 – PU – 3 A/B

Características:

- Motor: 460 V, 60 Hz, tres fases. Potencia: 9.5 kW.
- Velocidad: 1150 rpm. Flujo: 42 m³/h. a H -18 m
- Marca: FRIATEC AG País: Alemania.

Bomba centrífuga vertical de impelente sumergido cerrado. Motor eléctrico asíncrono de acoplamiento directo. El eje y el tubo de descarga con camisa a vapor. Su función

es transferir el azufre desde la piscina de azufre precapa hacia los filtros recirculando hasta la piscina de precapa, con el objetivo de revestir el filtro del material filtrante.

Agitador del derretidor. 1534 – AG – 3 A/B

Características:

- Marca: EKATO FLUID EM-2100
- Motor reductor: SEW Euro Drive
- Motor: Hew
- Potencia: 7.5 kW.
- Velocidad: 47 rpm.
- Velocidad Crítica: 187 rpm
- Diferencia de potencial: 460V. 3 Fases,60 Hz
- Protección: IP – 55.
- Altura base soporte –motor: 1840 mm
- Distancia entre impelente: 1025 mm
- El agitador puede operar cuando el impelente está cubierto por líquido
- Bending moment: 2856 Nm Torque 1528 Nm Axial force: 9074 N
- Tipo de impelente EKATO- viscoprop 25 2x2 paleta d2 1500 mm

Agitador de paletas. Los reductores son de tres escalones de engranajes helicoidales paralelos. El motor está acoplado al reductor mediante coupling flexible de amortiguadores de goma. El eje de salida coincide en centro con el eje del agitador, el cual se acopla mediante chaveta. Su función es agitar la masa de azufre líquido a la que se le adiciona sólido para facilitar la mezcla y la transferencia de calor y una temperatura uniforme.

Agitador de Piscina Azufre Sucio y Precapa. 1534 – AG – 2A/B/C y 03

Características:

- Marca: EKATO FLUID EM-2100
- Motor reductor: SEW Euro Drive
- Motor: Hew
- Potencia: 7.5 kW.
- Velocidad: 47 rpm.
- Velocidad Crítica: 215 rpm
- Protección: IP – 55.
- Altura base soporte –motor: 1840 mm
- Impelente montado al final del eje.
- Diferencia de potencial: 460V. 3 Fases,60 Hz

- El agitador puede operar en el llenado y vaciado del derretidor
- Bending moment: 1428 Nm Torque 1528 Nm Axial force: 8113 N
- Tipo de impelente EKATO- viscoprop 25 2x2 paleta d2 1500 mm

Agitador de paletas. Los reductores son de tres escalones de engranajes helicoidales paralelos. El motor está acoplado al reductor mediante coupling flexible de amortiguadores de goma. El eje de salida coincide en centro con el eje del agitador, el cual se acopla mediante chaveta. Su función es agitar la masa de azufre líquido que recibe la piscina de azufre sucio y mezclar la tierra diatomea con el azufre líquido en la piscina de precapa.

Transportador de Cal

Es un transportador Sinfín Tubular que alimenta la cal a la banda transportadora para la mezcla en el foso del Derretidor con el objetivo de eliminar la acidez del azufre.

Características:

- Tipo: TUZ 139/7500/S23/20/2.2 Tubo externo: 139 mm
- Longitud: 7500 mm Reductor tipo: S23
- Relación de transmisión: 20

1.6. Descripción del proceso tecnológico de Derretimiento y Filtrado de azufre

Esta sección cuenta con:

- Almacén a cielo abierto para Azufre sólido de 50 000 Ton. de capacidad.
- Dos tanques de almacenaje de azufre líquido de 2500 TM cada uno.
- Tres derretidores de azufre, cada uno posee:
 - Un alimentador de azufre sólido. - Nueve serpentines D-1 y 2
 - Veintiuno serpentines D-3 - Un agitador de paletas D-1 y D-2
 - Dos agitadores de paletas D-3 - Una bomba centrífuga vertical D-1 y D-2
 - Una torre de alimentación de cal.

El sistema para fundir azufre sólido consta de una primera etapa de almacenamiento, donde se recibe la materia prima que llega por vía marítima y se recibe a granel por vía marítima en el Puerto de Moa, donde es descargado de los buques mediante grúas y depositado en camiones que se encargan de trasladarlo al almacén a cielo abierto de la Planta. Un cargador frontal se encarga de manipular el azufre y alimentarlo a las tolvas y posteriormente por medio de un sistema de transporte de bandas se depositan

a los Derretidores. El azufre dosificado al foso del derretidor se mezcla mediante agitación mecánica con la masa de azufre líquido que llena el mismo hasta lograr la fusión o derretimiento del sólido. Todo esto se debe de reanalizar de manera controlada con la finalidad de no afectar la velocidad de la misma

Los Derretidores de Planta Vieja cuentan con 9 serpentines de tubos metálicos y el de la planta nueva con 21 serpentines a través de los cuales pasa el vapor saturado a una presión mayor a 40 lbf/pulg² (276 kPa), que garantiza una temperatura mayor a 130 °C y menor de 160 °C por encima del punto de fusión del azufre y por debajo del punto donde se eleva su viscosidad. En la planta nueva existe una válvula reguladora de vapor enlazada a un control automático de temperatura que permite mantener la temperatura de derretimiento en valores de 130 a 160 °C. El azufre líquido por encima del nivel de operación se extrae de los derretidores viejos (1 y 2) con una bomba centrífuga vertical sumergida, la cual lo bombea hacia la piscina de azufre sucio. Aquí es importante destacar que al azufre sólido que se alimenta a los Derretidores se le debe de dosificar cal con la finalidad de disminuir la acidez presente en la materia prima y así evitar la corrosión de las partes metálicas expuestas al azufre fundido dentro del sistema y mantener su eficiencia, esta se adiciona empleando el dosificador de cal que alimenta a la banda transportadora

El filtrado de azufre se realiza con 3 filtros de hojas a presión que trabajan de forma discontinua a los cuales se le alimenta primero una precapa filtrante de diatomea más azufre, la cual se adhiere a las paredes de las mallas, una vez cargado, están listo para realizar el filtrado del azufre sucio que se suministra con una bomba centrífuga desde la piscina de azufre sucio. El azufre filtrado se almacena en dos tanques de almacenajes y de aquí es transportado hasta la planta de Ácido Sulfúrico, (ver Anexo 1)

1.7. Conclusiones del capítulo I

1. De acuerdo con el análisis bibliográfico, existen numerosos trabajos dedicados a los intercambiadores de calor, por lo que existe bibliografía suficiente, y los principales trabajos realizados a los intercambiadores de calor en la empresa Cmdt. "Pedro Sotto Alba" se dedican al diagnóstico térmico de los intercambiadores de calor lo que garantiza una mejor comprensión del tema estudiado.

2. Quedaron establecidos los fundamentos teóricos que permiten reflejar las características de las materias primas que se emplean para la fundición de azufre, teniendo en cuenta varios aspectos como:

- Las propiedades del azufre.
- Las características específicas que ejercen un mayor impacto en el proceso de fundición del S que posteriormente será suministrado en la alimentación de la planta de ácido sulfúrico para la producción de Ni+Co.

CAPÍTULO II. MATERIALES Y MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN

A continuación, se describe el tipo de investigación que se va a desarrollar y se presentan de forma ordenada las herramientas metodológicas y las actividades que permiten lograr los objetivos establecidos.

La investigación es de tipo proyectiva, éste consiste en encontrar la solución a los problemas prácticos, se ocupa de cómo deberían ser las cosas para alcanzar los fines y funcionar adecuadamente. Para ello se ha de determinar el calor necesario para el derretimiento del azufre y se ha de verificar si dicho calor es suficiente para llevar a cabo este proceso.

A continuación, se presenta la metodología seguida en cada uno de los equipos.

2.1. Calor necesario para derretir el azufre

La capacidad calorífica es una propiedad extensa de la materia, lo que significa que es proporcional al tamaño del sistema. La capacidad calorífica C o lo que es lo mismo C_p , tiene la unidad de energía por grado o energía por kelvin. Cuando se expresa el mismo fenómeno como una propiedad intensiva, la capacidad calorífica se divide por la cantidad de sustancia, masa o volumen, por lo que la cantidad es independiente del tamaño o extensión de la muestra.

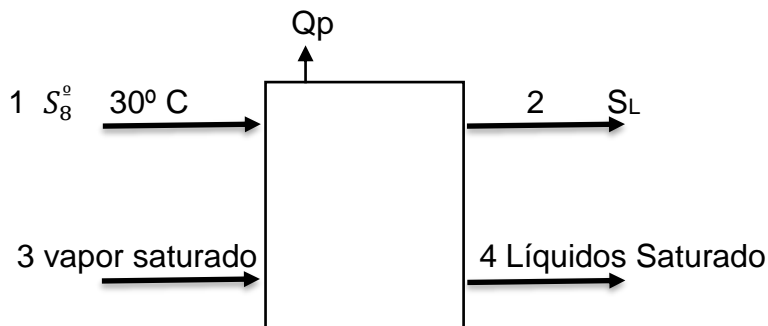


Figura 2. Esquema de corrientes que intervienen en el derretimiento del Azufre.

La cantidad de calor que se consume para lograr el derretimiento de azufre está dada por la siguiente ecuación:

$$Q = m \cdot C_p \cdot \Delta t \dots\dots\dots 1$$

Esta ecuación tiene que ver con las masas por su capacidad calorífica por la diferencia de la temperatura (temperatura de cambio del azufre menos la temperatura

de entrada del mismo), esto se debe al cambio de estructura cristalina del azufre en donde este cambia de azufre rómbico a monoclinico, por ende se debe de considerar dicha temperatura de cambio de estructura, o sea hay que calentar desde la temperatura que entró hasta la temperatura de cambio estructural, para el cual se consume energía una energía extra, así mismo hay que tener en cuenta la capacidad media del azufre monoclinico por la diferencia de temperatura existente entre la temperatura de fusión menos la temperatura de cambio de estructura, por lo que se estaría en presencia de un cambio de estado(azufre monoclinico a azufre líquido), por ende, se debe tener en cuenta la masa del azufre por la entalpía de cambio de estado de este y juntamente la necesidad de sumarle el sobrecalentamiento del azufre fusionado, el cual tuvo que ser calentado hasta una temperatura final (temperatura de transporte) por lo que la ecuación 1 será transformada y quedara de la siguiente forma:

$$Q = Q_m \cdot C_{P \text{ romb}} \cdot (t_{\text{cambio}} - t_{\text{entrada}}) + Q_m \cdot I_{\text{cambio}} + Q_m \cdot C_{P \text{ monoc}} \cdot (t_{\text{fusión}} - t_{\text{cambio}}) + Q_m \cdot I_s + Q_m \cdot C_{P \text{ líquido}} \cdot (t_{\text{final}} - t_{\text{fusión}}) \dots\dots\dots 2$$

donde, Q_m : flujo másico de azufre: (kg/h)

Q : Flujo de calor necesario (kcal/h)

C_p : capacidad calorífica media del azufre (kcal/kg °C)

t_{cambio} : temperatura de cambio de fase del azufre (°C)

$t_{\text{fusión}}$: temperatura de fusión del azufre (°C)

t_{entrada} : temperatura de entrada del azufre (°C)

I_{cambio} : entalpía de cambio de estructura del azufre (kcal/kg)

I_s : entalpía de cambio de estado del azufre (kcal/kg)

t_{final} : temperatura final (°C)

Nota: El (C_p) medio para llevar el azufre sólido de 30 °C hasta la temperatura de fusión es de 0.213 kcal/kg °C. Este (C_p) incluye el calor de transformación de azufre rómbico a monoclinico.

Por tanto, la fórmula (2) se simplifica quedando de la manera siguiente:

$$Q = Q_m \cdot C_{P(\text{rom-monoc})} \cdot (t_{\text{fusión}} - t_{\text{entrada}}) + Q_m \cdot I_s + Q_m \cdot C_{P \text{ s líquido}} \cdot (t_{\text{final}} - t_{\text{fusión}}) \dots\dots\dots 3$$

Para llevar a cabo este cálculo, se debe determinar la entalpía de cambio de estado o de fase que no es nada más que el intercambio energético que ocurre cuando un elemento cambia de estado (sólido, líquido o gaseoso). En el cual influye:

- Entalpía de fusión: el cambio de entalpía en la transición de estado sólido a líquido
- Entalpía de sublimación: el cambio de entalpía en la transición de sólido a gas.
- Entalpía de evaporación: el paso de líquido a gas (<https://www.significados.com/entalpia/>, s.f.).

La cantidad de calor que requiera ésta para cambiar 1 gramo de sólido a 1 gramo de líquido sin variar su temperatura. Es necesario saber que algunos datos de estos se pueden encontrar registrados en tablas, por ejemplo (el calor latente de fusión del azufre es 539.1969 kcal/kg).

Luego de tener todos los datos procedemos a sustituir los mismos en la ecuación 3 y determinar el calor necesario par derretir el azufre.

2.2. Calor necesario para evaporar el contenido de humedad presente en el azufre

Aquí se debe tener en cuenta el agua contenida en el azufre ya que se necesita una determinada cantidad de calor para evaporar el contenido de humedad que contiene el azufre. Para realizar este cálculo se emplea la siguiente fórmula.

$$Q_{\text{agua}} = Q_{m.\text{agua}} \cdot C_{P\text{agua}} \cdot (t_{\text{eb}} - t_{\text{entrada}}) + Q_{m.\text{agua}} \cdot I_{v \text{ agua}} + Q_{m.\text{agua}} \cdot C_{P \text{ vapor}} \cdot (t_{\text{vap}} - t_{\text{eb}}) \dots\dots\dots 4$$

donde, $Q_{m.\text{agua}}$: flujo másico de agua (kg/h)

$C_{P \text{ agua}}$: capacidad calorífica media del agua (kcal/kg °C)

Q_{agua} : flujo de calor necesario para evaporar el agua (kcal/h)

t_{eb} : temperatura de ebullición (°C)

t_{entrada} : temperatura de entrada del azufre (°C)

t_{vap} : temperatura de vapor del agua ($^{\circ}C$)

$I_{v \text{ agua}}$: entalpía de vaporización (kcal/kg)

2.3. Determinación del área de los serpentines

El transporte de calor desde una pared hacia un fluido o viceversa no es más que la emisión calorífica. La emisión calorífica por convección en movimientos forzados (corrientes turbulentas desarrolladas) a través de paredes cilíndricas en tubos y canales rectos está dada por la correspondiente ecuación:

$$Q_{conv} = \alpha \cdot F \cdot (t_{pared\ 2} - t_{s \text{ líquido}}) \dots\dots\dots 5$$

Despejando la ecuación (5) podemos determinar el área de los serpentines a través de la

ecuación siguiente:

$$F = \frac{Q_{conv}}{\alpha \cdot (t_{pared\ 2} - t_{s \text{ líquido}})} \dots\dots\dots 6$$

donde, F: área de la superficie de la transmisión de calor (m^2)

Q_{conv} : calor por convección (W)

α : coeficiente de emisión calorífica ($\frac{W}{m^2 \cdot K}$)

$t_{pared\ 2}$: temperatura de la pared (K)

$t_{s \text{ líquido}}$: temperatura del azufre líquido (K)

Se tienen dos interrogantes, o sea no se conoce el coeficiente de emisión calorífica (α), ni la temperatura de la pared del serpentín (t_{pared})

En el caso del coeficiente de emisión de calor para los aparatos con serpentines, camisas y agitadores se emplea la siguiente ecuación

$$Nu = \frac{\alpha \cdot d_{ag}}{\lambda} \dots\dots\dots 7$$

$$\text{despejamos a } \alpha \text{ y se obtiene } \alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{d_{ag}} \dots\dots\dots 8$$

donde, λ : coeficiente conductividad térmica

d_{ag} diámetro del agitador (m)

Nu: Nusselt el cual caracteriza la intensidad del paso de calor en límites flujo-pared

Para los tubos enroscados (serpentines), el valor de α obtenido conforme a la fórmula (8), se multiplica por el coeficiente (x) que considera la curva relativa del serpentín.

$$\alpha_{serp} = x\alpha \dots\dots\dots 9$$

$$x = 1 + 3,54 \cdot \frac{d}{D} \dots\dots\dots 10$$

donde, d: es el diámetro interior del tubo del serpentín

D: es el diámetro de la espira del serpentín

Para determinar dicho coeficiente hay que tener en cuenta varios criterios como por ejemplo el criterio de Reynolds y de Prandtl ya que se debe determinar el Nusselt a través de la ecuación siguiente:

$$Nu = C \cdot Re^m \cdot Pr^{0.33} \cdot \left(\frac{\mu}{\mu_{pared}}\right)^{0.14} \Gamma^{-1} \text{ tubos y canales rectos} \dots\dots\dots 11$$

donde,

Re : El número de Reynolds

Pr : número de Prandtl

μ : coeficiente dinámico de viscosidad del líquido a la temperatura de la pared de la camisa del serpentín

μ_{pared} : coeficiente dinámico de viscosidad del líquido a la temperatura media de la pared

Para los aparatos con camisas C= 0.36 y m= 0.67; para los aparatos con serpentines C= 0.87 y m= 0.62

Luego se determina el criterio o el número de Reynolds

El número de Reynolds es una expresión adimensional que permite caracterizar el movimiento de un fluido. Relaciona densidad, viscosidad, velocidad y la dimensión típica de un flujo. La presencia o ausencia de turbulencia en un fluido que se agita se puede relacionar con un número de Reynolds; en este caso se encarga de describir el movimiento característico del líquido en el tanque de agitación y está en función de la velocidad generada por el impulsor, de la viscosidad del líquido, densidad de la

mezcla y el diámetro del impulsor, por lo que su ecuación se describe de la siguiente, manera:

$$Re = \frac{n \cdot d_{ag}^2 \cdot \rho}{\mu} \dots\dots\dots 12$$

donde, n: velocidad de rotación [rps]

d_{ag} : diámetro del agitador [m]

ρ : densidad del fluido [kg/m³]

μ : viscosidad [kg/m·s]

El valor del número de Reynolds define si el carácter del fluido es turbulento o laminar. Además, se considera que el paso entre el régimen en laminar y el turbulento no es inmediato, pasando por una zona de transición. Se define de la siguiente manera:

Régimen laminar: $Re < 10$

Régimen transitorio: $2300 < Re < 10000$

Régimen turbulento: $Re > 10000$

El criterio de Prandtl caracteriza la relación entre propiedades de viscosidad y conductividad térmica del agente trasmisor de calor.

$$Pr = \frac{c \cdot \mu}{\lambda} \dots\dots\dots 13$$

donde, Cp. Calor específico a presión constante (kcal/kg °C)

μ : viscosidad [kg/m·s]

λ : coeficiente conductividad térmica (kcal/ (m·s· °C))

Teniendo en cuenta todo el orden operacional este parámetro Γ se ha de determinar de la forma siguiente:

$$\Gamma = \frac{D}{d_{ag}} \dots\dots\dots 14$$

donde, D: es el diámetro del recipiente.

Por otro lado, para determinar la temperatura de la pared del serpentín se ha determinado que se cuenta con tres calores incluyendo en flujo térmico

- Flujo térmico

$$Q = K \cdot F \cdot (t_c - t_f) \dots\dots\dots 15$$

donde, : Q : flujo térmico (W)

K : coeficiente de transmisión de calor ($\frac{W}{m^2 \cdot K}$)

F : área real del serpentín (m^2)

t_{cal} : temperatura del vapor (K)

$t_{pared 1}$: temperatura del azufre (K)

Aquí se tiene como incógnita al coeficiente de transmisión de calor K , el cual ha de calcularse teniendo en cuenta su fórmula correspondiente:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{cal}} + \frac{\delta_{par}}{\lambda_{par}} + \frac{1}{\alpha_{frio}}} \dots\dots\dots 16$$

donde, K : coeficiente de transmisión de calor ($\frac{W}{m^2 \cdot K}$)

α_{cal} : : coeficiente de emisión térmica del vapor ($\frac{W}{m^2 \cdot K}$)

α_{frio} : coeficiente de emisión térmica del azufre ($\frac{W}{m^2 \cdot K}$)

λ_{par} : coeficiente de conductividad térmica de la pared del serpentín

δ_{par} : Espesor de la pared del serpentín (m)

Teniendo en cuenta que para poder proceder con el procedimiento es necesario determinar el coeficiente de emisión calorífica para el vapor α_{cal} , para así, poder continuar con el desarrollo de la metodología.

En el caso del coeficiente de emisión de calor para tubos y canales rectos se determina de la manera siguiente

$$Nu = \frac{\alpha_{cal} \cdot d}{\lambda} \dots\dots\dots 17$$

$$\text{despejamos a } \alpha \text{ y se obtiene } \alpha_{cal} = \frac{Nu \cdot \lambda}{d} \dots\dots\dots 18$$

donde, λ : coeficiente conductividad térmica

Nu: Nusselt

De la misma manera que en la ecuación (8) el valor de α_{cal} obtenido conforme a la fórmula (18), se multiplica por el coeficiente (x) que considera la curva relativa del serpentín, es decir se tienen en cuenta lo planteado en las ecuaciones (9 y 10).

Del mismo para determinar dicho coeficiente hay que tener en cuenta varios criterios como por ejemplo el criterio de Reynolds y de Prandtl ya que se debe determinar el Nusselt a través de la ecuación siguiente:

$$Nu = 0,021 \cdot \varepsilon_l \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{0.43} \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_{pared}}\right)^{0.25} \text{ tubos y canales rectos19}$$

donde, Re : El número de Reynolds

ε_l : coeficiente de corrección

Pr : número de Prandtl

Pr_{pared} : Prandtl pared

Para el cálculo del Nusselt en primera instancia se determina los valores del coeficiente de corrección (ε_l): que tiene en cuenta la influencia que la relación de longitud del tubo (L) a su diámetro (d) se registran en el Cuadro 3. Cabe destacar que para los tubos de sección redonda $d_{eq} = d$.

Cuadro 3. Valor del coeficiente ε_l

Valor del coeficiente ε_l					
Valor del criterio Re	Relación L/d				
	10	20	30	40	50 y más
$1 \cdot 10^4$	1,23	1,13	1,07	1,03	1
$2 \cdot 10^4$	1,18	1,10	1,05	1,02	1
$5 \cdot 10^4$	1,13	1,08	1,04	1,02	1
$1 \cdot 10^5$	1,10	1,06	1,03	1,02	1
$1 \cdot 10^6$	1,05	1,03	1,02	1,01	1

Fuente: (Pávlov.K.F, 1981)

Luego se procede a determinar el criterio del Reynolds, pero esta vez un poco diferente pues ya no se ha de emplear la ecuación (12) para el Reynolds, sino que se utilizará otra, ya que la ecuación anterior no se ajusta a la condición que posee el vapor procedente que pasa por dentro de los serpentines.

Por tanto, el Reynolds ha de calcularse así:

$$Re = \frac{w \cdot d \cdot \rho}{\mu} \dots\dots\dots 20$$

donde, w : velocidad del fluido m/s

d : diámetro interior del serpentín m

Para determinar la velocidad del fluido se emplea la siguiente ecuación

$$Q = w \cdot s \dots\dots\dots 21$$

Despejando la ecuación (21), ese obtiene:

$$w = \frac{Q}{s} \dots\dots\dots 22$$

donde, $s = 0.785 \cdot d^2$, por tanto, la ecuación (22) procede a sufrir una pequeña modificación quedando reflejada como se muestra a continuación:

$$w = \frac{Q}{0.785 \cdot d^2} \dots\dots\dots 23$$

donde, w : velocidad del flujo m/s

Q : flujo másico (W)

d : diámetro del tubo (m)

Para la determinación del área interior de la pared se empleará la fórmula siguiente:

Para el criterio del Prandtl, si se empleara la ecuación (13)

- Calor por convección térmica del vapor hacia el vapor dado por la siguiente expresión

$$Q_{conv_{vap}} = \alpha_{vap} \cdot F \cdot (t_{cal} - t_{pared\ 1}) \dots\dots\dots 24$$

donde, $Q_{conv\ vap}$: calor por convección térmica del vapor hacia el azufre (W)

α_{vap} : coeficiente de emisión calorífica del vapor ($\frac{W}{m^2 \cdot K}$)

F : área de la superficie del serpentín (m²)

t_{cal} : temperatura del vapor (K)

$t_{pared\ 1}$: temperatura de la pared interior del serpentín (K)

- Calor por convección térmica del tubo hacia el azufre dado por la siguiente expresión

$$Q_{conv_{azuf}} = \alpha_{azuf} \cdot F \cdot (t_{pared\ 2} - t_{frio}) \dots \dots \dots 25$$

donde, $Q_{conv\ vap}$: calor por convección térmica del tubo hacia el azufre (W)

α_{azuf} : coeficiente de emisión calorífica del azufre ($\frac{W}{m^2 \cdot K}$)

F: área de la superficie del serpentín (m²)

t_{cal} : temperatura del azufre caliente (K)

$t_{pared\ 2}$: temperatura de la pared interior del serpentín (K)

Luego de plantear las fórmulas correspondientes a los distintos calores como se conoce el flujo térmico, se procede a igualar este con calor por convección térmica del vapor y el calor por convección térmica del azufre, o sea se igualan la ecuación (15), (24) y (25).

$$Q = Q_{conv_{vap}} = Q_{conv_{azufre}}$$

$$Q = \alpha_{vap} \cdot F \cdot (t_{cal} - t_{pared\ 1}) = \alpha_{azuf} \cdot F \cdot (t_{pared\ 2} - t_{cal}) \dots \dots \dots 26$$

De esta manera se determinará la temperatura de la pared interior y exterior del serpentín.

De tal manera que de esta expresión $Q = \alpha_{vap} \cdot F \cdot (t_{cal} - t_{pared\ 1})$ se despeja la $t_{pared\ 1}$

$$\frac{Q}{\alpha_{vap}} = F \cdot (t_{cal} - t_{pared\ 1}) \dots \dots \dots 27$$

$$\frac{Q}{\alpha_{vap}} = F \cdot (t_{cal} - t_{pared\ 1}) \dots \dots \dots 28$$

$$\frac{Q}{\alpha_{vap} \cdot F} = (t_{cal} - t_{pared\ 1}) \dots \dots \dots 29$$

$$t_{cal} + \frac{Q}{\alpha_{vap} \cdot F} = -t_{pared\ 1} \quad (\cdot -1) \dots \dots \dots 30$$

$$t_{p1} = t_{cal} - \frac{Q}{\alpha_{vap} \cdot F} \dots \dots \dots 31$$

Del mismo modo se trabaja con la próxima expresión para así poder obtener $t_{pared\ 2}$

$$Q = \alpha_{azuf} \cdot F \cdot (t_{pared\ 2} - t_{frio})$$

$$\frac{Q}{\alpha_{azuf}} = F \cdot (t_{pared\ 2} - t_{frio}) \dots\dots\dots 32$$

$$\frac{Q}{\alpha_{azuf}} = F \cdot (t_{pared\ 2} - t_{frio}) \dots\dots\dots 33$$

$$\frac{Q}{\alpha_{azuf} \cdot F} = (t_{pared\ 2} - t_{frio}) \dots\dots\dots 34$$

$$t_{p2} = t_{frio} + \left(\frac{Q}{\alpha_{azufre} \cdot A} \right) \dots\dots\dots 35$$

2.4. Calor perdido al medio ambiente

En la mayoría de las situaciones prácticas, es muy raro que se transfiera toda la energía por un solo medio de transferencia de calor. El proceso global de transferencia de calor por lo general será una combinación de dos o más mecanismos diferentes.

La ecuación que se utiliza generalmente para calcular la transferencia de calor a través de una superficie utilizada en el procedimiento de diseño y que forman parte de la teoría de intercambio de calor es:

$$Q = K \cdot F_{ml} \cdot (t_{cal} - t_{frio}) \dots\dots\dots 36$$

donde, Q es el flujo térmico (cantidad de calor transmitido) (W)

K : coeficiente de transmisión del calor $\left(\frac{W}{m^2 \cdot K} \right)$

F : área de la superficie de la transmisión del calor (m^2)

t_{cal} : temperatura del azufre caliente (K)

t_{frio} : temperatura del aire (K)

En este caso no conocemos ni el coeficiente total de trasmisión de calor (K) ni el área

2.4.1. El coeficiente total de trasmisión de calor K

Esta toma en cuenta tanto la resistencia conductora y de convección entre dos fluidos separados por una pared sólida. El coeficiente total de trasmisión de calor, es el recíproco de la resistencia total a la transferencia de calor: que es la suma de las resistencias individuales.

El coeficiente total de transmisión de calor puede que también tenga en cuenta el grado de suciedad en el proceso de transmisión de calor. La deposición de una película o incrustaciones en la superficie de transferencia de calor reducirá en gran medida la tasa de transferencia de calor.

Para una superficie plana el coeficiente de transmisión de calor K se determina de la manera siguiente:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{caliente}} + \sum r_{pared} + \frac{1}{\alpha_{frío}}} \dots\dots\dots 37$$

donde, α_{cal} y α_{fr} son los coeficientes de emisión calorífica (de traspaso de calor) para el agente portador de calor caliente y calor frío ($\frac{W}{m^2 \cdot K}$)

$\sum r_{pared}$ sumatoria de las resistencias térmicas de todas las capas que integran la pared.

Aquí nos damos cuenta que para poder determinar dicho coeficiente debemos de tener en cuenta los coeficientes de emisión térmica tanto para el agente portador caliente (azufre) como para el frío (aire) y sin duda alguna sumatoria de las resistencias térmicas de todas las capas que integran la pared por tanto K es igual a:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{caliente}} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_{frío}}} \dots\dots\dots 38$$

donde, λ_1 y λ_2 coeficiente de conductividad térmica se la pared 1 y 2

δ_1 espesor de la pared 1 y δ_2 espesor de la pared 2

Aquí para determinar el coeficiente de emisión térmica frío α_{fr} en este caso (aire), se utilizará otro procedimiento pues la ecuación a utilizar es la siguiente:

$$Nu = 0.018 \cdot \epsilon_l \cdot Re^{0.8} \dots\dots\dots 39$$

Y bueno el criterio de Reynolds se ha de desarrollar mediante la ecuación (20)

2.4.2. Área media logarítmica

Como se trata del revestimiento de un tanque cilíndrico con distintos aislantes. En estas situaciones, el área perpendicular al transporte no va a ser constante, sino que dependerá de lo alejada que se encuentre la capa de estudio del centro del cilindro. Por ello, se recurre al área media logarítmica F_{ml} para el cálculo de las resistencias

debidas a la conducción (anexo 8). Para la resistencia debida a la convección, usaremos el área lateral de un cilindro ($F=2\pi rl$), usando el radio que corresponda en cada caso (interior o exterior). Aquí, el coeficiente global de transporte habrá que referirlo al área interna o externa (F_{ref}),

$$F_{ml} = \frac{2\pi rl(r_2-r_1)}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \dots\dots\dots 40$$

donde, F_{ml} área media logarítmica (m^2)

π constante pi

l : largo (m)

r_2 : radio exterior del derretidor (m)

r_1 : radio interior del derretidor (m)

2.5. Determinación del consumo de vapor necesario

Para determinar el consumo de vapor se ha de tener en cuenta el calor que consume el azufre, el calor que consume el agua y la entalpía que posee el vapor.

$$\frac{Q_{asuf}+Q_{agua}+Q_{perdido}}{I_v} = consumo\ de\ vapor \dots\dots\dots 41$$

2.6. Calculo para determinar si el calor empleado es el calor suficiente para derretir el azufre

Para determinar si el calor empleado, es el calor suficiente para derretir el azufre se estará trabajando con la ecuación de emisión calorífica por convección en movimientos forzados (corrientes turbulentas desarrolladas) a través de paredes cilíndricas en tubos y canales rectos o sea la ecuación (25), pero aquí si se tendrá en cuenta el área real que poseen los serpentines.

Todo este método de trabajo se empleará para los derretidores 1,2 y 3, exceptuando que, para determinar el calor perdido al medio ambiente, en el derretidor 3, no se ha de utilizar la ecuación (40) para el cálculo del área, sino que se ha de determinar mediante el área de un ortoedro:

$$F = 2 \cdot (a \cdot b + a \cdot c + b \cdot c) \dots\dots\dots 42$$

Donde, F : área del rectángulo (m^2)

- a: largo (m)
- b: ancho (m)
- c: altura (m)

Por otro lado, se ha de emplear para el cálculo del coeficiente de emisión térmica y del criterio del Reynolds, el diámetro equivalente ya que en las condiciones no circulares se calcula un diámetro equivalente a partir del área de la sección de paso y su perímetro mojado, por tanto

$$P = 2(a + b) \dots\dots\dots 43$$

$$d_{eq} = \frac{4 \cdot F}{P} \dots\dots\dots 44$$

donde, d_{eq} diámetro equivalente (m)

F Área (m²)

P perímetro (m)

$$Re = \frac{w \cdot d_{eq} \cdot \rho}{\mu} \dots\dots\dots 45$$

$$Nu = \frac{\alpha \cdot d_{eq}}{\lambda} \dots\dots\dots 46$$

despejamos a α y se obtiene $\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{d_{eq}} \dots\dots\dots 47$

2.7. Conclusiones capítulo II

1. Se establecieron los métodos para el cálculo para la determinación del:
 - Calor necesario para derretir el azufre y para la evaporación del agua que contiene en dicho azufre, para así verificar si dicho calor es suficiente para llevar a cabo este proceso.
 - Área de los serpentines, para los sistemas de derretimiento del azufre ubicado en la planta de Derretimiento y filtrado de azufre de la empresa.
 - Calor perdido al medio ambiente.

CAPÍTULO III. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados obtenidos según la ejecución de los objetivos trazados durante el planteamiento del problema, así como también la discusión de los mismos, fundamentada en bases teóricas y prácticas.

3.1. Análisis del comportamiento de las características químicas críticas del azufre

En

el

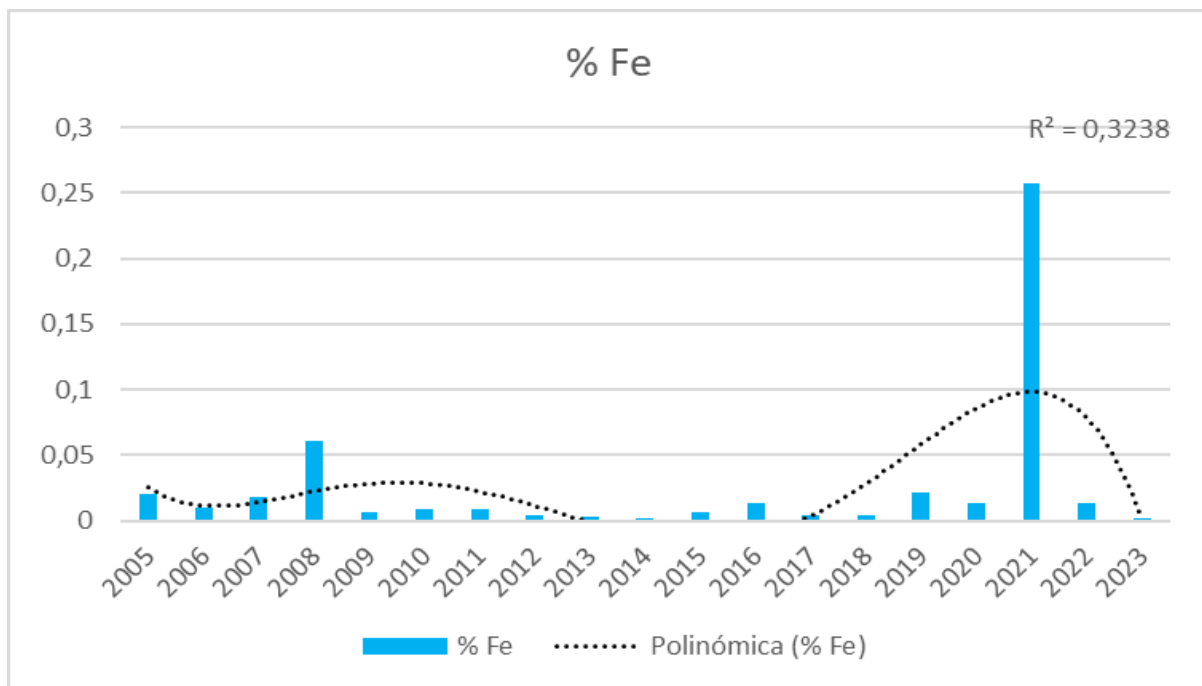


Gráfico 1, se puede observar como el hierro se ha mantenido de manera estable, o sea cumple con las condiciones establecidas según las especificaciones del azufre registradas en el

Cuadro 1.

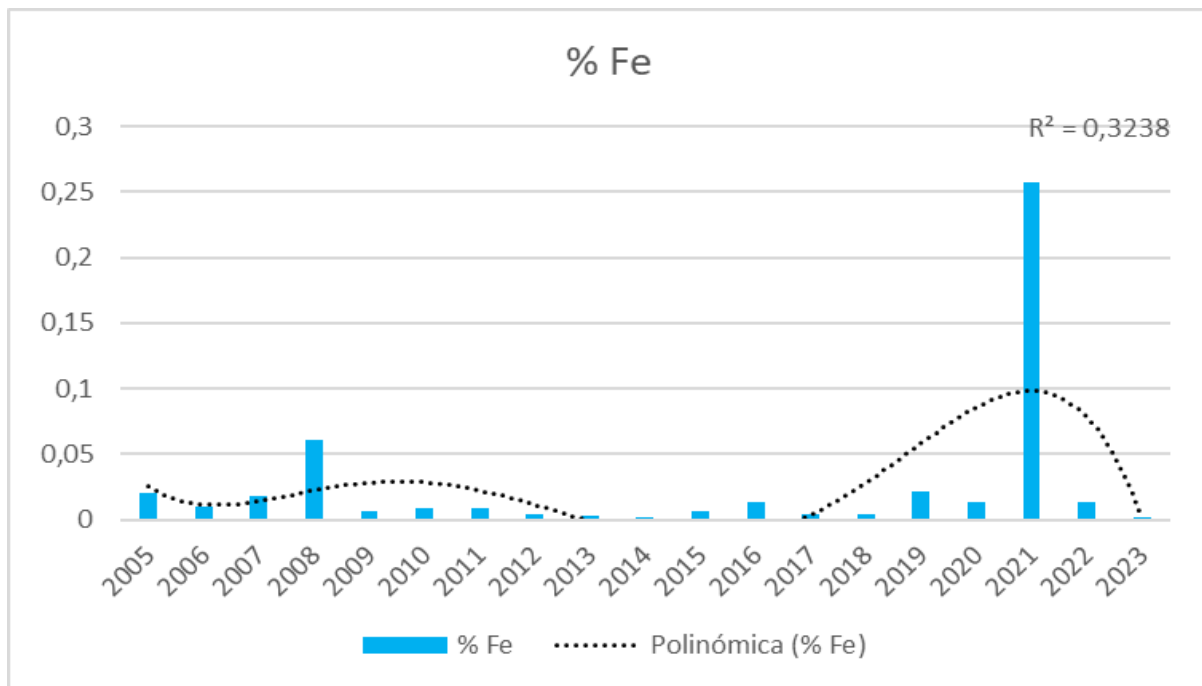


Gráfico 1. Análisis del comportamiento del hierro en el azufre

Los Gráfico 2 Gráfico 3, evidencian el incrementando la acidez y la humedad en el azufre. Una de las razones por las cuales puede estar ocurriendo dicho incremento es que el azufre que se está recibiendo con diferentes procedencia, no sea extraído mediante el proceso Claus el cual recupera el azufre del sulfuro de hidrógeno gaseoso que se encuentra en el gas natural crudo y de los gases subproductos que contienen sulfuro de hidrógeno derivado de la refinación del petróleo crudo y otros procesos industriales, sino que se esté extrayendo de depósitos subterráneos mediante el proceso Frasch.

El azufre que se almacena en bloque y luego se recupera mediante fusión o medios mecánicos está sujeto a contaminación debido a que ha sido almacenado al aire libre expuesto a los elementos y condiciones climáticas, también la manipulación y el transporte de azufre a granel presentan muchas oportunidades de mayor contaminación. Por otro lado, se determina que la acción de las bacterias ocurre en el rango de temperatura de 5 a 35 °C y las bacterias son más activas en el rango de temperatura de 25 a 35 °C y si se analiza en Moa, los veranos son cálidos, opresivos y nublados y los inviernos son calurosos, húmedos, secos, ventosos y mayormente despejados. Durante el transcurso del año, la temperatura generalmente varía de 20 °C a 33 °C y rara vez baja a menos de 18 °C o sube a más de 34 °C, lo que quiere decir que el hecho de almacenar el azufre al aire libre y dejarlo expuesto a los

elementos y condiciones climáticas favorecen el incremento de las bacterias ocurriendo así un incremento de la acción microbiológica o sea un aumento de la fuente primaria de la acidez en el azufre (Douglas K.Louie,P.Eng , 2005) .

Para neutralizar la acidez se adiciona cal, la cual provoca que se incrementen las cenizas que se encuentran en el azufre antes de la filtración, pero sin embargo no se puede dejar de añadir porque el contenido de agua y acidez en el azufre forma ácido diluido, sulfúrico y sulfuroso, que atacará el acero al carbono en los tanques de almacenamiento y las tuberías y el concreto en los pozos de almacenamiento. Lo que quiere decir que la mala alimentación de la cal genera un incremento de esta acidez; acidez que conduce al ponche de los serpentines

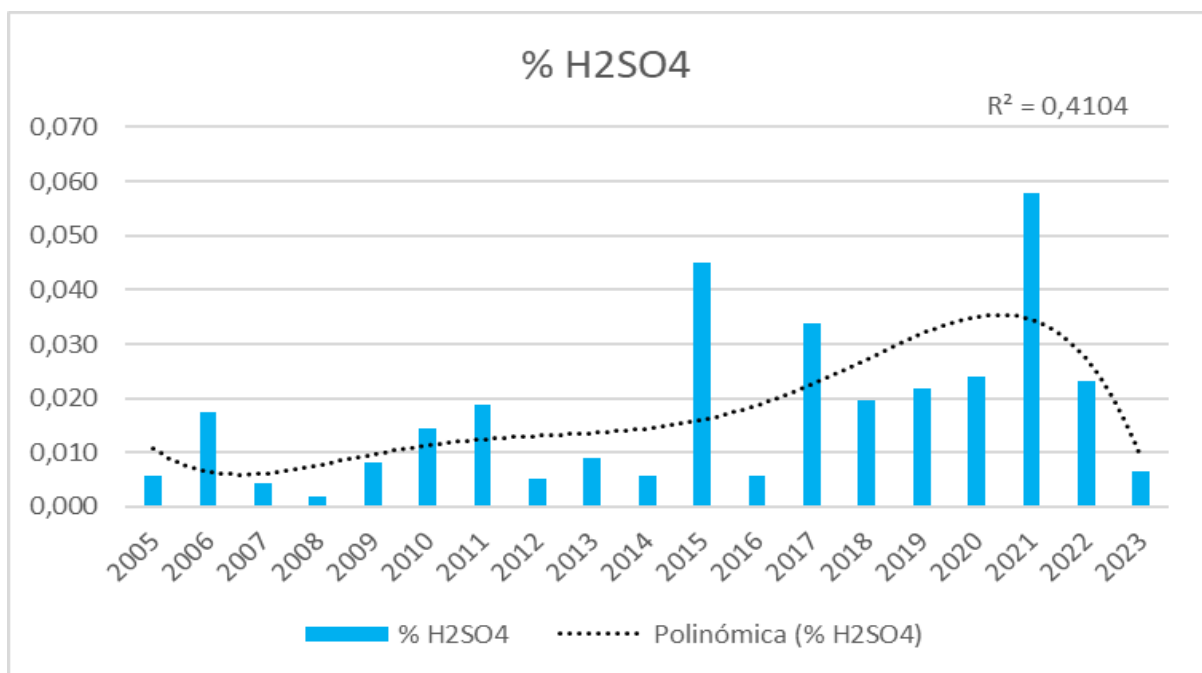


Gráfico 2. Análisis del comportamiento de la acidez en el azufre

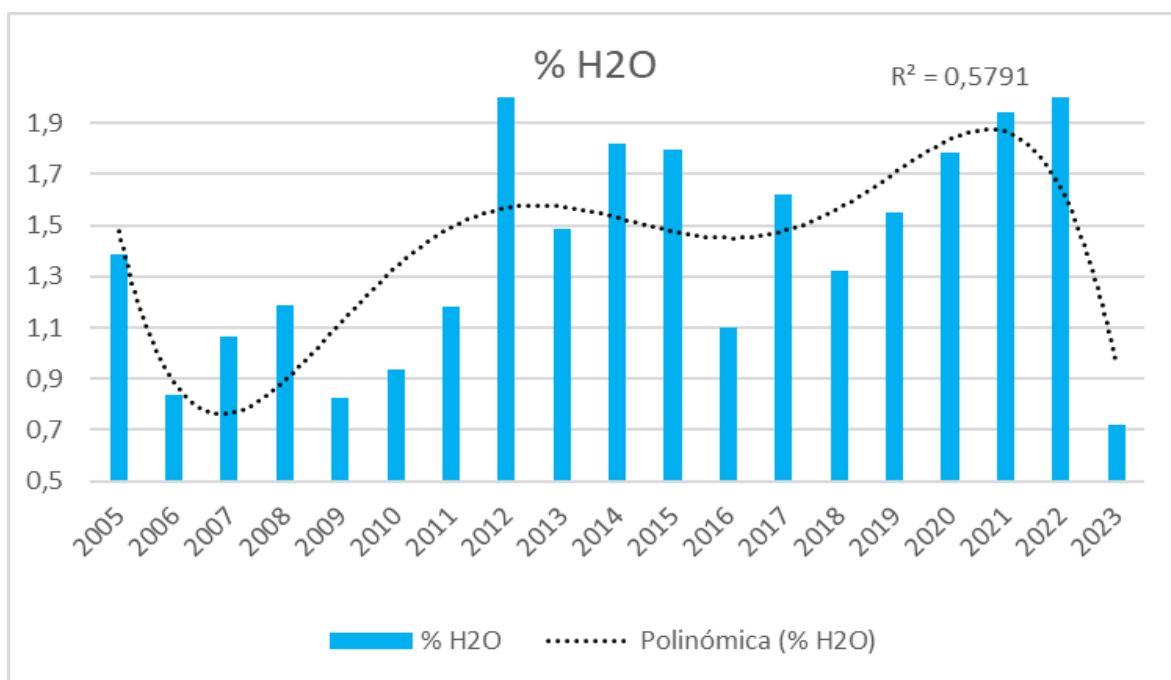


Gráfico 3. Análisis del comportamiento de la humedad en el azufre

En el Gráfico 4, se muestra que las cenizas se han mantenido de manera estable, pero se debe tener en cuenta que el simple hecho de que se extraiga azufre mediante el método Frasch, puede favorecer el incremento de este parámetro, pues, por ejemplo, la cantidad de cenizas/sólidos que contaminan el azufre depende de la fuente de este. Los niveles de cenizas tienden a ser más altos en el azufre extraído, ya sea como un mineral extraído del suelo o mediante este método pues el contacto íntimo entre el azufre y el suelo circundante hace que sea difícil la extracción del mismo sin recoger contaminantes. El método Frasch de extracción de depósitos de azufre nativos puede recoger minerales solubles en agua que encuentran su camino hacia el azufre producto. Ver Anexo 4.

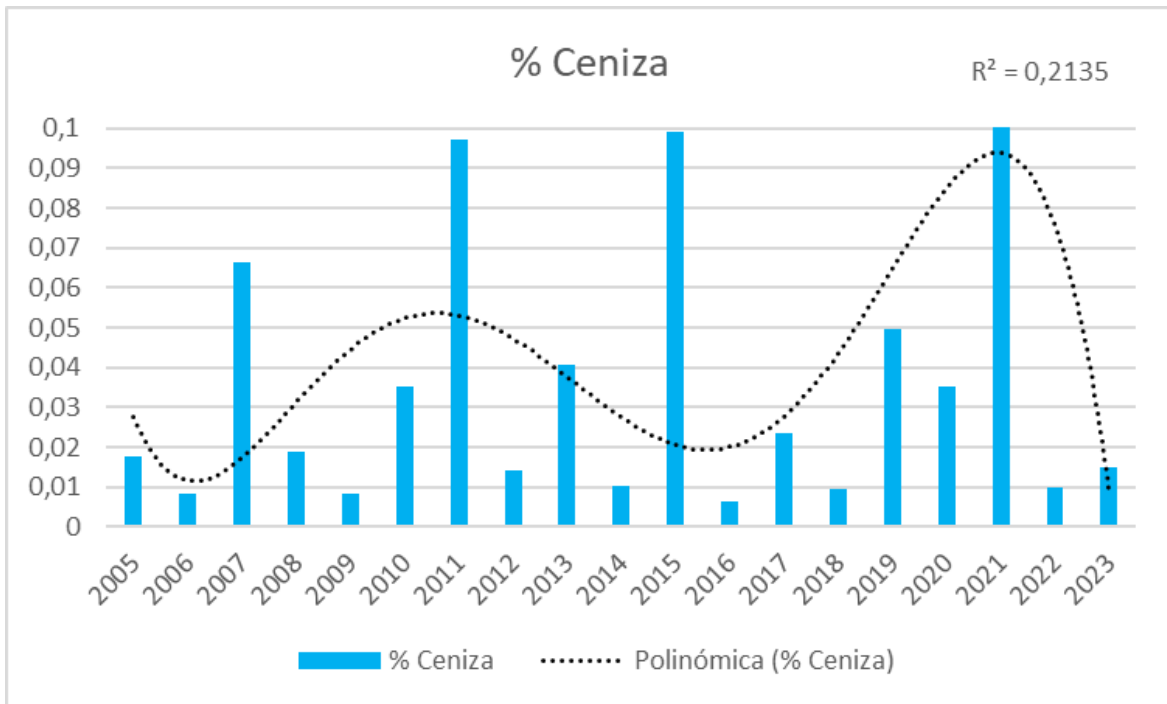


Gráfico 4. Análisis del comportamiento de la ceniza en el azufre

El azufre puro mantiene su color amarillo, si es contaminado con pequeñas cantidades de bitumen como carbón es pardo o negruzco. El llamado azufre oscuro puede mantener 0.08 -1 % de material bituminoso medido como carbón. La mayoría de este material orgánico está presente como complejo orgánico de sulfuro (Carsul) y no es posible remover por simple filtración y si utilizando tierra diatomea la cual absorbe este elemento. De ahí se llega a la conclusión de porqué usar tierra diatomea y no otro material filtrante. La formación de este polímero está constituida por azufre + carbono y ocurre cuando el azufre es calentado por encima de los 130 °C. En el Gráfico 5, se puede observar el comportamiento de este elemento el cual se ha mantenido de manera estable durante todo el período.

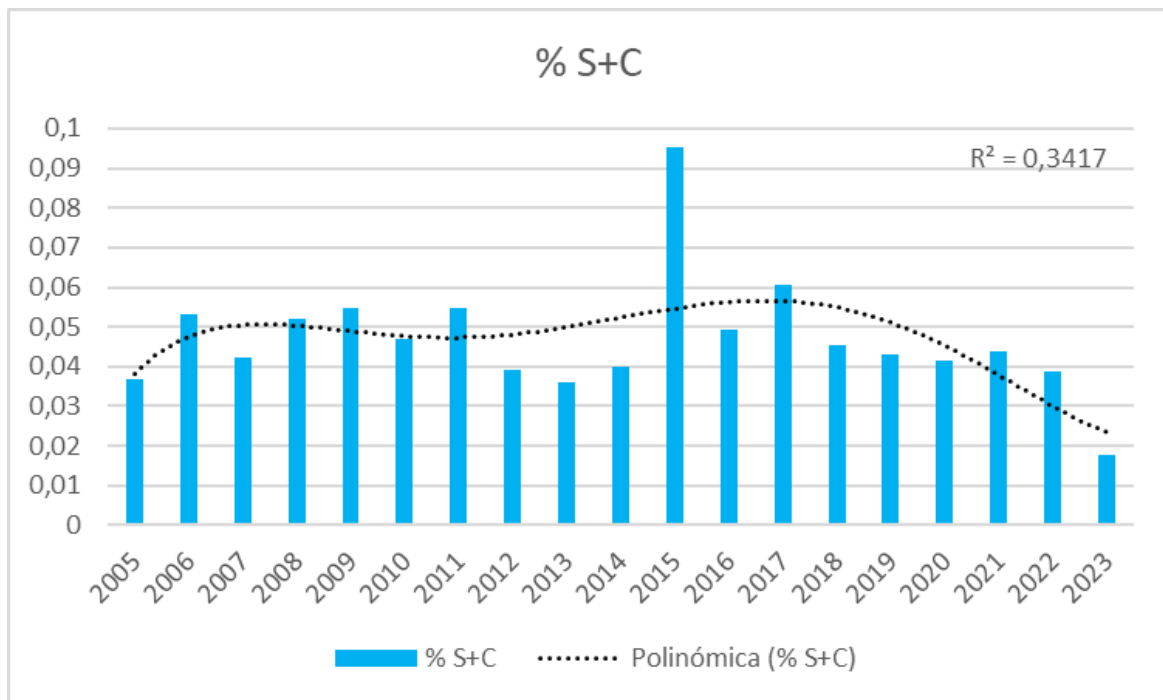


Gráfico 5. Análisis del comportamiento del consul en el azufre

3.2. Caracterización del sistema de alimentación hacia la Planta de derretimiento y filtrado de azufre

El azufre proveniente de diferentes regiones del mundo arriba al Puerto de Moa en los distintos buques, es trasladado hacia la plataforma de azufre mediante camiones. Para llevar a cabo este proceso se tiene que mover un volvo de rechazo de la Planta de Cieno Carbonatado lo que disminuye la disponibilidad de la Planta y a la vez se genera un alto consumo de diésel. A razón de esto se necesita ver como trasportar el azufre, pues cada vez más, el transporte y trasiego de materiales supone un factor importante a tener en cuenta en la rentabilidad económica de cualquier actividad, ya sea industrial, minera, agrícola o de cualquier otra índole. Se estima que, en algunos sectores, los gastos de transporte pueden suponer entre el 40-50% los gastos de explotación, por lo que se hace necesario seleccionar de manera eficiente el tipo de transporte más adecuado a cada situación.

3.2.1. Caracterización del sistema de alimentación de Cal

El sistema de alimentación de Cal, alimenta a tres derretidores de manera manual, o sea por cada una derretida, se adiciona una tanqueta de cal. Esto sucede, debido a varias afectaciones o por falta de mantenimiento, por ejemplo:

- En el derretidor 1 y 2, el sinfín y la grúa, no están instalados, este último, en el segundo derretidor, no se puede instalar debido al poco espacio existente, no obstante, por un breve tiempo este sistema si se puso en marcha, pero sin embargo no funcionó.
- En el derretidor 3 se ha deteriorado la grúa polipasto ya que el cable de la misma se ha trabado y no funciona por falta de mantenimiento.

3.3. Caracterización del Sistema de alimentación en los Derretidores

En la planta de derretimiento, se derrite 48 ton/h de azufre brillante. El sistema de derretimiento de azufre cuenta con tres derretidores. Los derretidores 1 y 2, derriten 14 ton/h cada uno, mientras que el derretidor 3, que es de mayor capacidad derrite 20 ton/h, aunque el diseño se realizó para 30 ton/h. Para llevar a cabo este derretimiento se emplea vapor de 85 PSI aunque en muchas ocasiones puede llegar un vapor De hasta 100 PSI, con un flujo de 30 000 lb/h, por tanto, teniendo en cuenta el calor necesario para derretir el azufre y evaporar el contenido de humedad que contiene el mismo, y al determinar el área necesaria para llevar a cabo dicho proceso, se aprecia que en estos momentos la transferencia de calor existente no es el mejor, puesto que los derretidores 1 y 2, consta de un área superficial de transferencia de 180 m² cada uno, mientras que el 3 dispone de un área de 330,72 m², y el área que se necesita es mucho mayor, lo que conlleva a que el calor empleado para derretir el azufre sea insuficiente.

Teóricamente se necesita en el derretidor 1 y 2, 2200 m² de área, mientras que en el tres 10036 m². Ver tabla 1.

Pero se sabe que la práctica es más rica que la teoría, por eso aun cuando teóricamente, según la transferencia de calor con una temperatura fija para el azufre líquido, se necesita más área de transferencia que la empleada, en la práctica se está llevando a cabo el derretimiento del azufre brillante con las condiciones actuales. Esto se debe a que solo se ha considerado la transferencia de calor del azufre a la temperatura media del líquido cosa que no está mal, pero hay otros factores que entran a jugar como es la cinética del derretimiento y específicamente el problema de Stefan, en donde este científico, planteó que no se puede desarrollar con ecuaciones simples, sino con derivadas parciales porque la frontera de cambio de fase se

desplaza en tiempo, ya que disminuye el tamaño de la partícula en dependencia al tiempo y a su vez la temperatura, dependiendo esto de la granulometría del sólido.

Tabla 1. Parámetros a tener en cuenta para llevar a cabo el derretimiento de azufre brillante

	Derretidor 1	Derretidor 2	Derretidor 3
Calor necesario para derretir el azufre	18280 kW	18280 kW	12994 kW
Calor necesario para evaporar y calentar el agua	37 kW	37 kW	26 kW
Área necesaria para los serpentines	2200 m ²	2200 m ²	10036 m ²
Calor perdido al medio ambiente por las paredes del equipo	60 Kw	60 kW	118 kW
Calor empleado es el suficiente para derretir el azufre	1499 kW	1499 kW	431 kW
Consumo de vapor	38008 lb/h	38008 lb/h	50404 lb/h

3.4. Caracterización del sistema de filtrado y almacenamiento del azufre líquido

El sistema de filtrado y almacenamiento de azufre, influye en la eficiencia del proceso, por la mala alimentación de cal y la calidad del azufre, lo que provoca que la acidez aumente, afectando así las mallas de los filtros, lo que ocasiona el paso de cenizas y de corsul a los tanques donde se almacena azufre líquido, de los cuales el TK - 8B se encuentra fuera de operación por deterioro, pues se teme que se derrame o se congele. La planta está en espera de la confirmación de demolición de este y de la debida construcción de un nuevo tanque de almacenamiento que lo sustituya.

Este problema da lugar a que el azufre procesado, este por debajo de la demanda existente en la planta de ácido sulfúrico.

Debe destacarse que el filtro 1B, está fuera de sistema por lo que la planta solo trabaja con dos filtros, para abrirlo, hay que hacerlo con una señorita ya que la bomba de aceite no ejerce presión para abrirlo y accionar el cilindro, y que, al parecer este posee de azufre, por lo que adquiere presión por sí solo.

3.5. Propuestas de mejoras y optimización para toda la planta

Para mejorar las condiciones de trabajo de estos equipos se propone una serie de medidas tales como:

- Demolición del derretidor 2 para la construcción de otro derretidor como el 3 y agrandamiento del 1, juntamente con esto se propone el aumento de la longitud de los serpentines y la adición de otro agitador, ya que la velocidad de agitación incrementa el coeficiente de transferencia de calor.

- La disminución del tamaño de las partículas por trituración o por exigencia a los proveedores también puede ser un mecanismo para incrementar el coeficiente de transferencia de calor en las partículas para mejorar su derretimiento, mecanismo que se explica en el problema de Stephan.
- Si se incrementa la longitud de los serpentines, se estima obtener el área requerida para el derretimiento o simplemente una aproximación muy cercana a esta. Ahora en el caso del 3, se requiere un incremento de la velocidad de agitación en los agitadores, lo que propiciara la disminución su área necesaria y el incremento de la productividad, este incremento de velocidad se logra con un motor de mayor potencia en el agitador.
- Incrementar la presión de vapor que entra a la planta de manera tal que propicie un mayor calor latente para lograr un mayor coeficiente de emisión calorífica del vapor y mejorar la transferencia de calor durante el derretimiento.
- Revisar los sistemas de alimentación de cal detenidamente y darle su debido mantenimiento, de tal manera que se restablezca, para así disminuir la acidez, y conservar los tanques de almacenamiento, las tuberías, los serpentines y las mallas de los filtros que son atacadas por esta.
- Diagnosticar un período de duración para el mantenimiento de los equipos, menor al establecido.
- Se propone derribar el TK-8B de almacenamiento de azufre líquido, y en su lugar crear uno de mayor capacidad de almacenamiento.

3.6. Conclusiones del capítulo III

1. Se aplicó la metodología expuesta en el capítulo II para el cálculo de diferentes calores, el área de los serpentines y las pérdidas al medio ambiente en los derretidores, obteniendo como resultado que en los derretidores el área de diseño es mucho menor que el área calculada.
2. Se realizó un análisis de las características químicas- físicas críticas del azufre, donde se determinaron las razones que dan lugar al incremento de la acidez y de la humedad dentro de este, además de dejar reflejado el comportamiento estable del hierro y del corsul (mezcla de azufre y carbono que solo es removida con tierra diatomea).
3. Se planteó una serie de medidas para el mejoramiento de los sistemas y de general el mejoramiento de la planta y el incremento de la productividad.

CONCLUSIONES GENERALES

A realizar el presente se llegó a las siguientes conclusiones:

1. La metodología de cálculo establecidas en el presente trabajo, garantizan la obtención de los parámetros necesarios para la correcta operación para la determinación del cálculo de diferentes calores, el área necesaria para los serpentines en cada derretidores y las pérdidas al medio ambiente en los derretidores lo que propicia la determinación de las características y las condiciones reales en las que están operando los equipos necesarios para llevar a cabo el derretimiento y filtrado de azufre.
2. En el proceso de fundición de azufre existen características críticas que afectan de forma directa el cambio de fase, estas son: pureza del azufre, contenido de humedad, acidez, contenido de ceniza y tamaño de partícula. Una vez analizadas estas características se han dejado reflejadas varias de las razones que dan lugar al incremento de las mismas, pero también se ha definido el comportamiento estable del hierro y del corsul (mezcla de azufre y carbono que solo es removida con tierra diatomea).
3. Se propuso una serie de propuestas de mejoras para la planta a partir de las condiciones reales de los equipos y las características de la materia prima.

RECOMENDACIONES

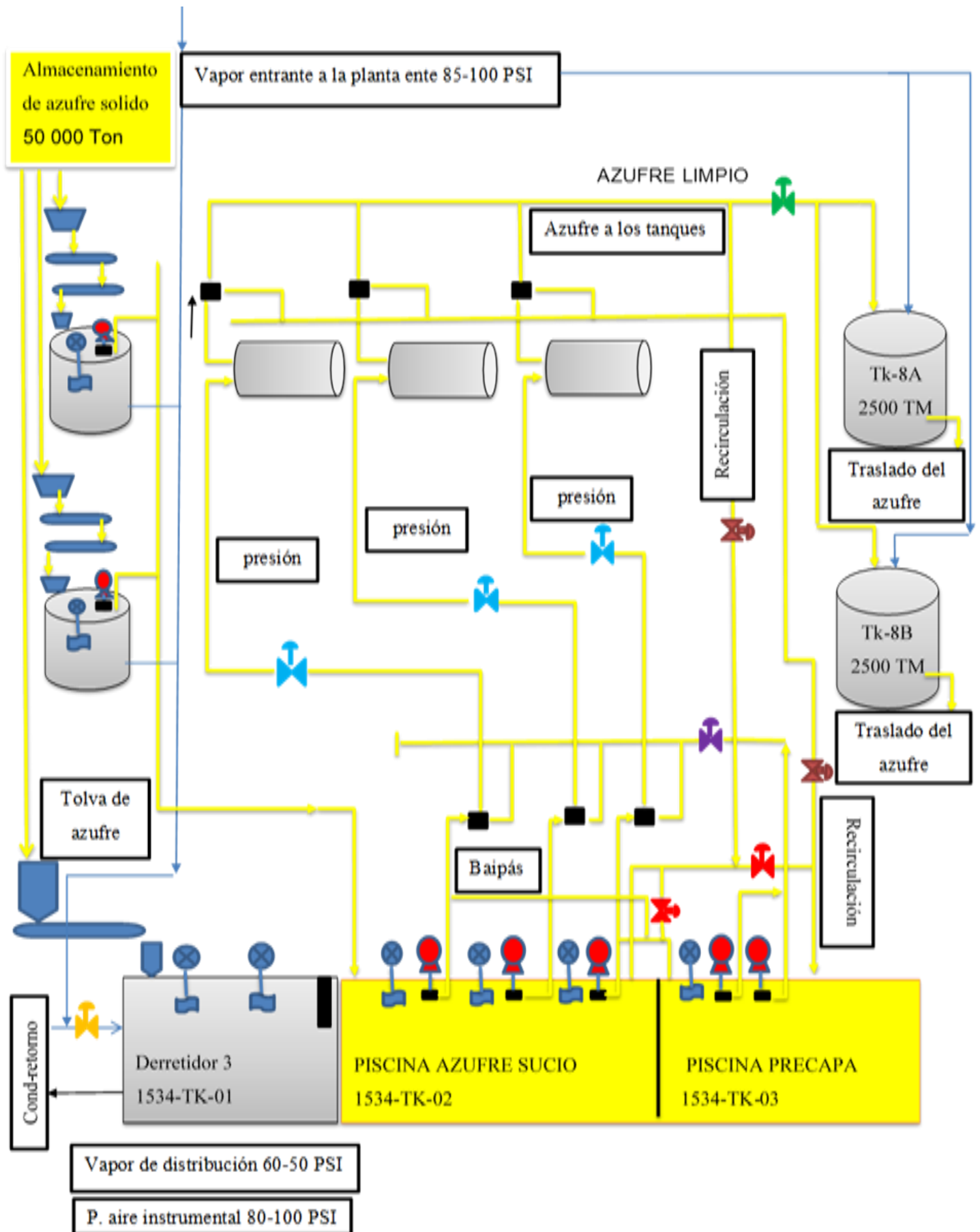
1. Se recomiendan evaluar la logística de manejo y transporte de azufre sólido y con esto preparar un plan para el suministro oportuno de la materia prima.
2. Se sugiere tener en cuenta las medidas propuestas en el presente trabajo.

Bibliografía

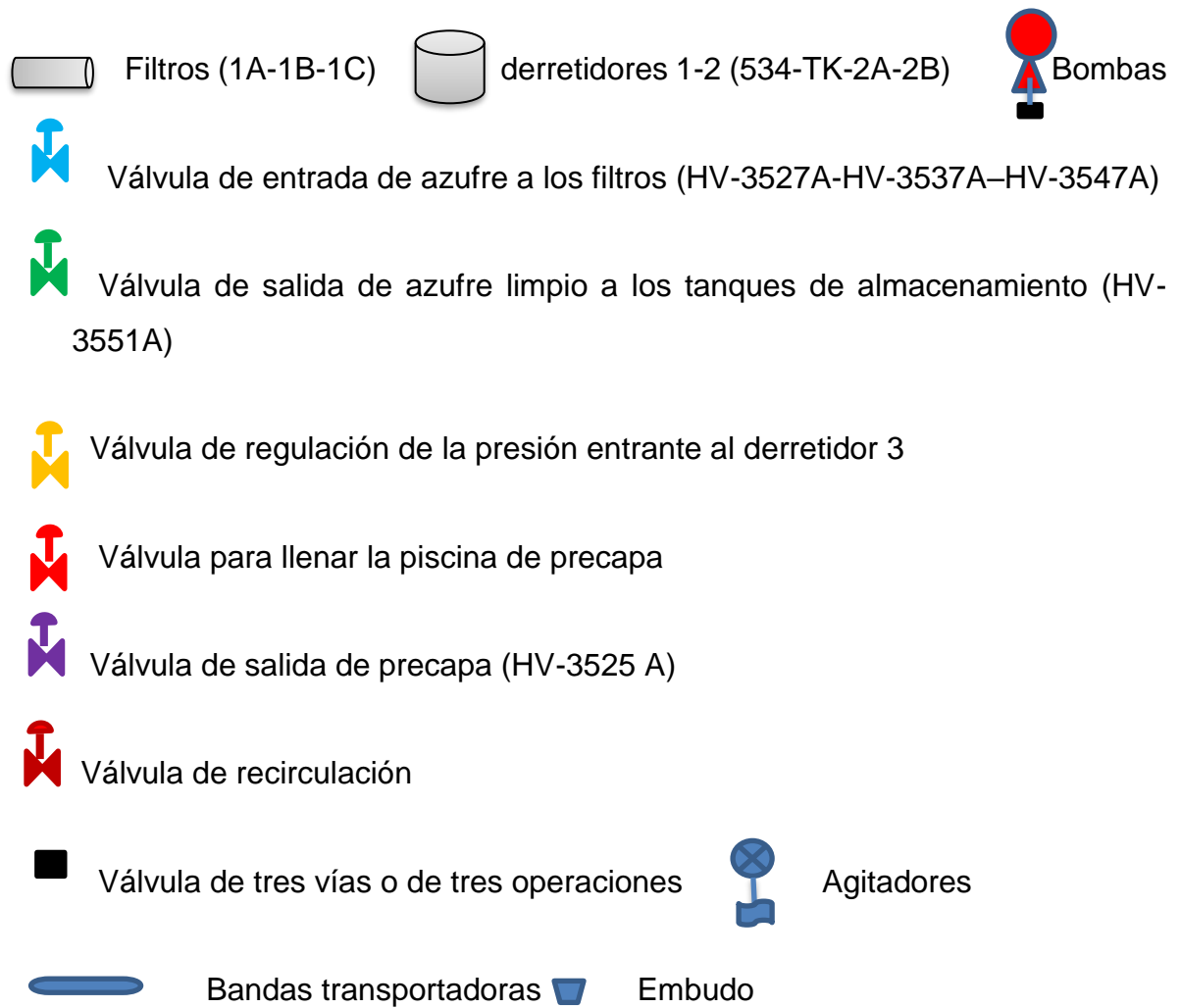
- García Andrade , Laura Rebeca; Mejías Meré , Jaime Ab; Silva achardo, Jesús Salvador . (Diciembre del 2008.). *Diseño de una cámara fotográfica para la preservación de carne de res en la ciudad de Puebla, Puebla*. MÉXICO, D.F.
- Barreto Inca, Wily Martir. (2015). *Diseño, construcción y prueba de un intercambiador de serpentín y coraza para un banco de trampas de vapor*. Arequipa - Perú.
- Chávez, L. (1976). *Sistema de transportación del azufre líquido*. Trabajo de Diploma. Moa: ISMM.
- (s.f.). *d-csc-02-manual-de-operaciones-planta-de-derretimiento-y-filtrado-de-azufre-vers.pdf*.
- Donald Q. Kern. (1969). *Procesos de transferencia de calor*. La Habana: Edición Revolucionaria.
- Douglas K.Louie,P.Eng . (2005). *Handbook of sulphuric acid manufacturing* . Canada: Dkl engineering Inc. Thornhill, Ontario .
- <http://www.calcinor.com/es/actualidad/reviews-producto/cal-tratamiento-gases>. (s.f.). *La cal en el tratamiento de gases - CALCINOR*. Obtenido de <http://www.calcinor.com/es/actualidad/reviews-producto/cal-tratamiento-gases>
- <http://www.es.wikipedia.org/Óxido de Calcio>. (s.f.). *Óxido de calcio-enciclopedia libre*. Obtenido de Óxido de calcio
- <http://www.gdo.mx/minería/Diatomita-ENE>. (ENERO de 2020). *Diatomita-ENE*. Obtenido de <http://www.gdo.mx/minería/Diatomita-2020-ENE>
- <https://es.wikipedia.org/wiki/Azufre>. (s.f.). *Azufre*. Obtenido de <https://es.wikipedia.org/wiki/Azufre>
- <https://www.significados.com/entalpia/>. (s.f.). *Entalpía*. Obtenido de <https://www.significados.com/entalpia/>
- Ortiz Cortéz, Luz María . (s.f.). *Preparatoria abierta Puebla calor específico ,calor latente*.
- Pávlov.K.F. (1981). *Problemas y ejemplos para el curso de operaciones básicas y aparatos en tecnología química*. Moscú: Editorial MIR.
- Rian Oconor Arévalo. (2014). *Diseño de la estructura contable para el control de la inversión Nueva Planta de Ácido en Moa Nickel S.A*. moa .
- Rodriguez, Swann. (enero 2014). *Diseño de un sistema de fundición y almacenamiento de azufre sólidos provenientes de los mejoradores de cruods de ANZOÁTEGUI para alimentar a una palnta de ácido sulfúrico en Morón,estado Carabobo*. Venezuela.

- Trejo Cuevas, Oscar. (Mayo 2006). *Aprovechamiento de azufre residual como componente de concreto base azufre*. Monterrey,NL.
- Vázquez Navarro, Nelson A. (2017-2018). *Actualización del balance de vapor de la Empresa Moa Nickel S. A “Pedro Sotro Alba” con la incorporación de la Nueva Planta de Ácido*. MOA.

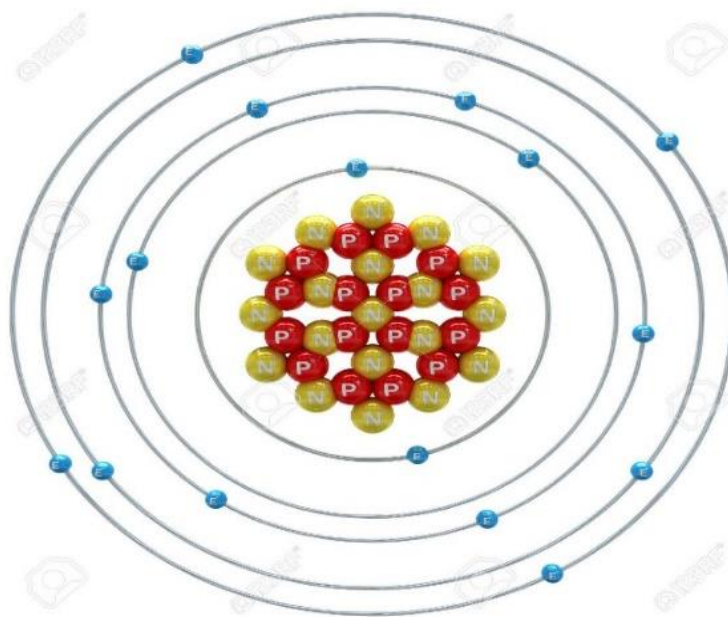
ANEXOS



Leyenda



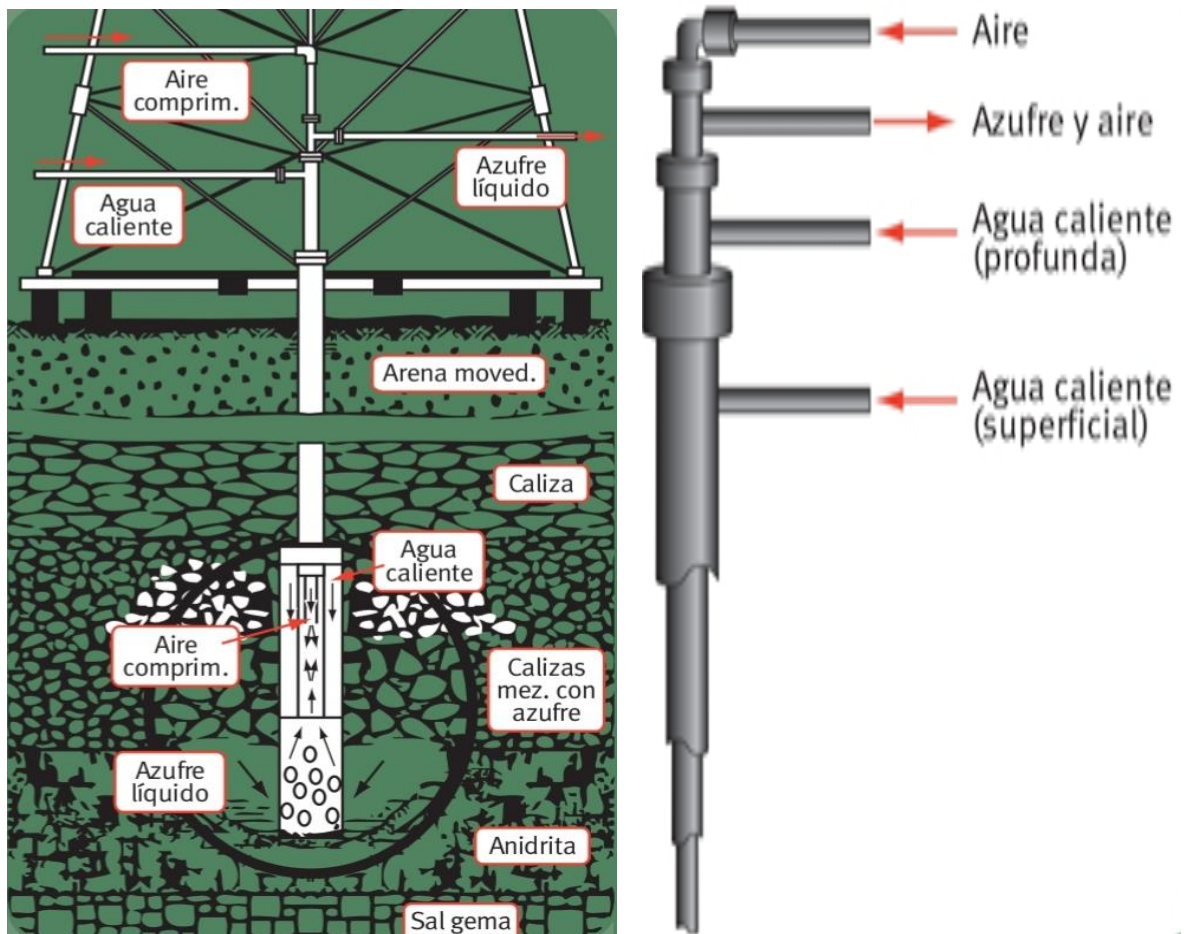
Anexo 1. Diagrama tecnológico de la panta de derretimiento y filtrado de azufre



Anexo 2. Estructura atómica del azufre



Anexo 3. Forma del azufre en su estado rômico y su estado monoclinico



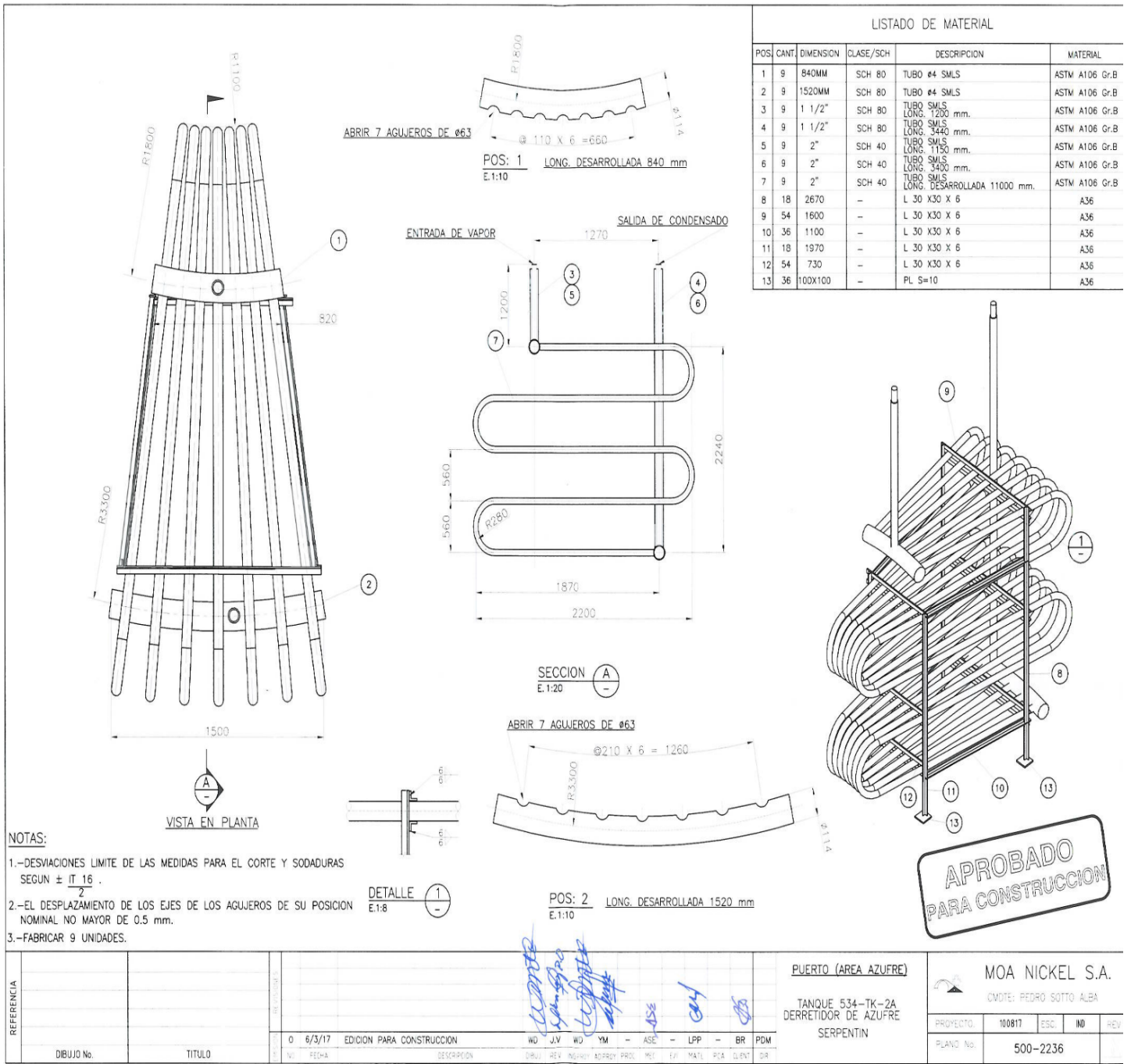
Anexo 4. Extracción del azufre por el método de Frasch



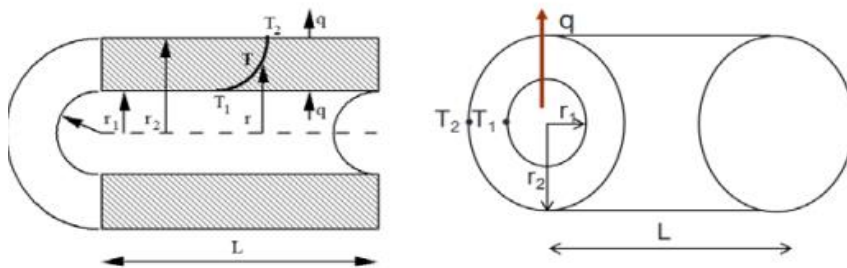
Anexo 5. Azufre sucio



Anexo 6. Azufre expuesto a elementos y a las condiciones climáticas



Anexo 7. Diseño de los serpentines de los derretidores 1 y 2



Anexo 8. Representación de la variación del área perpendicular al transporte de calor en superficies cilíndricas y ajuste mediante el área logarítmica