



**DISEÑO DE UN SISTEMA DE FUNDICIÓN Y
ALMACENAMIENTO DEL AZUFRE SÓLIDO PROVENIENTE
DE LOS MEJORADORES DE CRUDO DE ANZOÁTEGUI
PARA ALIMENTAR A UNA PLANTA DE ÁCIDO
SULFÚRICO EN MORÓN, ESTADO CARABOBO**



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
ÁREA DE ESTUDIOS DE POSTGRADO
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE MAestrÍA EN INGENIERÍA DE PROCESOS

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE FUNDICIÓN Y ALMACENAMIENTO DEL
AZUFRE SÓLIDO PROVENIENTE DE LOS MEJORADORES DE CRUDO
DE ANZOÁTEGUI PARA ALIMENTAR A UNA PLANTA DE ÁCIDO
SULFÚRICO EN MORÓN, ESTADO CARABOBO**

AUTOR: ING. SWANN RODRÍGUEZ
TUTOR: ING. LUDAVI FUENMAYOR

VALENCIA, ENERO 2014



**UNIVERSIDAD DE CARABOBO
ÁREA DE ESTUDIOS DE POSTGRADO
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE PROCESOS**

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE FUNDICIÓN Y ALMACENAMIENTO DEL
AZUFRE SÓLIDO PROVENIENTE DE LOS MEJORADORES DE CRUDO
DE ANZOÁTEGUI PARA ALIMENTAR A UNA PLANTA DE ÁCIDO
SULFÚRICO EN MORÓN, ESTADO CARABOBO**

AUTOR: ING. SWANN RODRÍGUEZ

Trabajo presentado ante el Área de Estudios de Postgrado de la Universidad de Carabobo para optar al Título de Magíster en Ingeniería de Procesos

VALENCIA, ENERO 2014



**UNIVERSIDAD DE CARABOBO
ÁREA DE ESTUDIOS DE POSTGRADO
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE PROCESOS**

VEREDICTO

Nosotros, miembros del jurado designado para la evaluación del trabajo de grado titulado: DISEÑO DE UN SISTEMA DE FUNDICIÓN Y ALMACENAMIENTO DEL AZUFRE SÓLIDO PROVENIENTE DE LOS MEJORADORES DE CRUDO DE ANZOÁTEGUI PARA ALIMENTAR A UNA PLANTA DE ÁCIDO SULFÚRICO EN MORÓN, ESTADO CARABOBO, presentado por la Ing. Swann Rodríguez para optar al Título de Magister en Ingeniería de Procesos, estimamos que el mismo reúne los requisitos para ser considerado como APROBADO.

Carlos Hernández

CI.

Presidente del Jurado

Katiuska Franceschi

CI.

Jurado

Alicelis Hurtado

CI.

Jurado

AUTOR: ING. SWANN RODRÍGUEZ

VALENCIA, ENERO 2014



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCIÓN DE POSTGRADO



ACTA DE APROBACIÓN DEL PROYECTO DE TRABAJO DE GRADO

Por medio de la presente hacemos constar que el Proyecto de Trabajo de Grado titulado: "DISEÑO DE UN SISTEMA DE FUNDICIÓN Y ALMACENAMIENTO DE AZUFRE SÓLIDO PROVENIENTE DE LOS MEJORADORES DE CRUDO DE ANZOÁTEGUI PARA ALIMENTAR A UNA PLANTA DE ÁCIDO SULFÚRICO EN MORÓN, ESTADO CARABOBO" Presentado por la ciudadana: **Swann Rodríguez**, alumno regular del Programa de Maestría en INGENIERÍA DE PROCESOS, reúne los requisitos exigidos para la inscripción.

El MSc. **Ludavi Fuenmayor**, Aceptó la tutoría de este Trabajo, según Constancia anexa.

En Valencia, a los veintinueve días del mes de mayo del año Dos mil Doce

Por La Comisión Coordinadora:


Prof. Carlos Hernández
Jefe del Programa


Prof. Olga Martínez
Miembro




Prof. Alberto Mieres
Miembro

UNIVERSIDAD DE CARABOBO / DIRECCIÓN DE POSTGRADO

FACULTAD DE INGENIERÍA NAGUANAGUA SECTOR BARBULA - Teléfonos Directos: (0241) 8672629 / 8674288 - 8678865 EXT 102. FAX - (0241) 8671855 <http://postgrado.ing.uc.edu.ve>



DEDICATORIA

1. A Dios por darme la fuerza de voluntad, la seguridad, paciencia y el ímpetu para seguir cada día adelante a pesar de las adversidades.
2. A mi hermosa familia por estar siempre ahí apoyándome, cada uno a su manera, en todos los retos que me trazo diariamente; en especial a mi Abuela, ejemplo de mujer luchadora, capaz, estudiosa y que siempre me ha brindado su amor incondicional.
3. A Cleyver, sin palabras que puedan expresar todo lo que me has brindado y el agradecimiento que te mereces por ser como eres conmigo, bendito Dios por encontrarnos en el camino.
4. A mis amigos, aquellos que me han brindado su amistad desinteresada, que siempre me han apoyado, que siempre han estado para darme una palabra de aliento, para lamentar momentos difíciles y para celebrar esos días de alegría y gloria que siempre estarán en mi corazón y mi memoria.



AGRADECIMIENTOS

1. Al Ing. Ramón Méndez, por haberme ayudado en la elección del tema de tesis y por ser mi tutor auxiliar en este trabajo, agradezco que a pesar de la distancia siempre estuviste a la orden para brindarme el apoyo técnico y profesional que necesité y por mantenerme motivada durante el desarrollo de este trabajo.
2. A la Ing. Ludavi Fuenmayor, por haber aceptado la tutoría de esta tesis aportando siempre su dedicación y tiempo en la revisión de cada capítulo que escribí, tus comentarios fueron de mucha ayuda y sirvieron para mejorar aún más el resultado final, además me brindaste tu amistad y comprensión en todo momento.
3. Al Ing. Oscar Gelvis, Ing. Julio Altamiranda, Ing. Verónica Salcedo, Vivian Velásquez y otros compañeros de trabajo, por su colaboración en la obtención de información técnica importante y necesaria para el desarrollo de cada objetivo, invaluable la ayuda que ustedes me brindaron.



ÍNDICE GENERAL

	Pág.
RESUMEN	xii
ABSTRACT	xiii
INTRODUCCIÓN	xiv
CAPÍTULO I. EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	1
1.1 Planteamiento del Problema.....	1
1.2. Formulación del problema.....	4
1.3. Objetivos de la Investigación.....	4
1.3.1. Objetivo general.....	4
1.3.2. Objetivos específicos.....	4
1.4. Justificación.....	5
1.5. Limitaciones.....	6
1.6. Alcance.....	6
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO.....	7
2.1. Antecedentes.....	7
2.2. Bases teóricas.....	10
2.2.1. Azufre.....	10
2.2.2. Ácido sulfúrico.....	11
2.2.3. Producción de ácido sulfúrico.....	12
2.2.4. Transferencia de calor.....	13
2.2.4.1. Naturaleza del flujo de calor.....	13
2.2.4.2. Intercambiadores de calor para sólidos.....	16
2.2.4.2.1. Equipos para solidificación.....	17
2.2.4.2.2. Equipos para fusión.....	18
2.2.4.2.3. Equipos de transferencia de calor para sólidos divididos.....	19



	Pág.
CAPÍTULO III. MARCO METODOLÓGICO.....	25
3.1. Tipo de estudio y de investigación.....	25
3.1.1 Tipo de estudio.....	25
3.1.2 Tipo de investigación.....	25
3.2. Diseño de la Investigación.....	25
3.3. Determinación de las características químicas y físicas críticas para el diseño del sistema de fundición de azufre sólido proveniente de los mejoradores de crudo en Anzoátegui.....	26
3.4. Determinación de los parámetros de diseño del sistema de fundición del azufre sólido proveniente de los mejoradores de crudo en Anzoátegui.....	30
3.5. Diseño de un sistema de almacenamiento capaz de recolectar el azufre fundido proveniente de la unidad de fundición.....	31
3.6. Propuesta de la instrumentación básica del sistema de fundición y almacenamiento del azufre fundido que será alimentado a la planta de ácido sulfúrico ubicada en Morón, estado Carabobo...	32
3.7. Establecimiento de las hojas de especificaciones de los equipos principales del sistema de fundición y almacenamiento de azufre líquido.....	34
3.8. Estimación de los costos de la propuesta para determinar la factibilidad de su implementación.....	34
CAPÍTULO IV. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	37
4.1. Determinación de las características químicas y físicas críticas para el diseño del sistema de fundición de azufre sólido proveniente de los mejoradores de crudo en Anzoátegui.....	37



	Pág.
4.2. Determinación de los parámetros de diseño del sistema de fundición del azufre sólido proveniente de los mejoradores de crudo en Anzoátegui.....	41
4.3. Diseño de un sistema de almacenamiento capaz de recolectar el azufre fundido proveniente de la unidad de fundición.....	57
4.4. Propuesta de la instrumentación básica del sistema de fundición y almacenamiento del azufre fundido que será alimentado a la planta de ácido sulfúrico ubicada en Morón, estado Carabobo.....	62
4.5. Establecimiento de las hojas de especificaciones de los equipos principales del sistema de fundición y almacenamiento de azufre líquido.....	65
4.6. Estimación de los costos de la propuesta para determinar la factibilidad de su implementación.....	72
4.6.1 Estimación de costos.....	72
4.6.2. Premisas generales y financieras de la evaluación económica.....	73
4.6.3. Resultados económicos.....	75
4.6.4. Indicadores de rentabilidad y análisis de sensibilidad.....	76
CONCLUSIONES.....	79
RECOMENDACIONES.....	80
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	81
APÉNDICES.....	85
ANEXOS.....	121



ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 2.1. Equipos de transferencia de calor para sólidos. (a) Tipo tanque horizontal, (b) Reervidor agitado y (c) Molino de doble tambor.....	24
Figura 4.1. Diagrama del proceso del sistema de fundición y almacenamiento de azufre.....	43
Figura 4.2. Diagrama de flujo de proceso del sistema de fundición y almacenamiento de azufre.....	45
Figura 4.3. Parámetros de diseño del silo de almacenamiento (TFS01).....	49
Figura 4.4. Parámetros de diseño de la cinta transportadora (TFS02).....	52
Figura 4.5. Parámetros de diseño del tanque de fundición (TSF03).....	55
Figura 4.6. Curvas de cabezal de la bomba de azufre fundido.....	56
Figura 4.7. Parámetros de diseño del tanque de almacenamiento (TAF06).....	61
Figura 4.8. Diagrama de procesos e instrumentación del sistema de fundición y almacenamiento de azufre (P&ID).....	64
Figura 4.9. Sensibilidad de la inversión, precio del producto y precios de las materias primas sobre la tasa Interna de retorno.....	77
Figura 4.10. Sensibilidad de la inversión, precio del producto y precios de las materias primas sobre el valor presente neto.....	78



ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1.1. Características del azufre sólido obtenido en un mejorador de crudo pesado en Anzoátegui.....	3
Tabla 4.1. Especificaciones fisicoquímicas que debe cumplir el azufre fundido en la alimentación de una planta de ácido sulfúrico.....	39
Tabla 4.2. Características del azufre sólido obtenido en el Mejorador 1 de Anzoátegui.....	39
Tabla 4.3. Características del azufre sólido obtenido en el Mejorador 2 de Anzoátegui.....	40
Tabla 4.4. Lista de Equipos en el sistema de fundición de szufre....	44
Tabla 4.5. Lista de componentes presentes en el sistema.....	44
Tabla 4.6. Balance de masa y energía en la etapa de fundición de azufre.....	47
Tabla 4.7. Lista de equipos en el sistema de almacenamiento de azufre.....	58
Tabla 4.8. Balance de masa y energía en la etapa de almacenamiento de azufre.....	58
Tabla 4.9. Hoja de especificación del silo de alimentación de azufre sólido.....	65
Tabla 4.10. Hoja de especificación de la cinta transportadora de azufre sólido.....	66
Tabla 4.11. Hoja de especificación del tanque de fundición de azufre.....	68
Tabla 4.12. Hoja de especificación de la bomba de azufre fundido.....	69



	Pág.
Tabla 4.13. Hoja de especificación del filtro de azufre fundido.....	70
Tabla 4.14. Hoja de especificación del tanque de almacenamiento de azufre fundido.....	71
Tabla 4.15. Costos totales de la propuesta de implementación de un sistema de fundición y almacenamiento de azufre.....	72
Tabla 4.16. Costos referenciales de operación (MMUSD).....	75
Tabla 4.17. Ingresos estimados durante la operación de la planta (MMUSD).....	76
Tabla 4.18. Indicadores financieros.....	76



RESUMEN

El objetivo principal de este trabajo fue diseñar un sistema de fundición y almacenamiento del azufre sólido proveniente de los mejoradores de crudo de Anzoátegui, el cual será recibido en el muelle del Complejo Petroquímico Morón y deberá alimentar a la nueva planta de ácido sulfúrico. Actualmente el balance de azufre líquido en el país es deficitario, por lo que se debe garantizar su obtención, ya que de lo contrario se puede generar un impacto directo en la cadena de fertilizantes y a la vez en el sector agrícola y alimenticio del país. Con la finalidad de lograr el propósito de la investigación se determinaron 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 partícula; posteriormente se realizaron pruebas de laboratorio para obtener dichas características en muestras de azufre sólido, lo que permitió iniciar con el diseño del sistema de fundición y almacenamiento del azufre fundido. Durante la elaboración del diseño se obtuvieron los balances de masa y energía del sistema y las especificaciones de diseño de los equipos principales. Finalmente, se realizó la estimación de costos del sistema de fundición y almacenamiento de azufre y se determinó la factibilidad de la implementación de esta propuesta. En esta investigación se evidencia que con la implementación del diseño propuesto se puede abastecer todo el requerimiento de azufre para la planta de ácido sulfúrico, siendo el mismo a su vez económicamente factible de acuerdo a las especificaciones y estimados presentes en este estudio.

Palabras claves: ácido sulfúrico; almacenamiento de azufre líquido; azufre; fertilizantes; fundición de azufre sólido; petroquímica.



ABSTRACT

This work consist in the design of a melting and storage system of sulfur from crude refining, the sulfur will be received in the Petrochemical Complex located in Carabobo and will feed the new sulfuric acid plant. Currently, in Venezuela the demand of liquid sulfur is greater than the supply, and this could generate significant effects on the fertilizer industry, agriculture and food production; this is why is important to ensure the availability of the liquid sulfur. To achieve the objective of the investigation, the chemical and physical properties of the sulfur required in the sulfuric acid production were determined, as a first stage in the design of the melting system; this properties are the purity of the sulfur, the moisture content, acidity, the presence of ash and the particle size; later some laboratory tests were performed to obtain these characteristics in samples of solid sulfur, which allowed to start with the design of the all system. The mass and energy balances and the specifications of major equipment were obtained during the system design. Finally, the cost estimate of the melting and storage system of sulfur was performed and the economic feasibility of implementing this proposal was determined. This research shows that the proposal is economically feasible according to the results, and allows considering an alternative to ensure all of the raw material requirements of the sulfuric acid plant.

Keywords: sulfuric acid; liquid sulfur storage; sulfur; fertilizers; solid sulfur melting; petrochemical.



INTRODUCCIÓN

Pequiven es una empresa que genera productos petroquímicos destinados a satisfacer parte de la demanda nacional, dentro de estos productos se encuentran los fertilizantes fosfatados que se utilizan ampliamente en el sector agrícola nacional, para la producción de estos fertilizantes es necesario el uso de ácido fosfórico como materia prima, el cual a su vez utiliza el ácido sulfúrico en su formulación. Es por esto que la producción de ácido sulfúrico es fundamental en el país y Pequiven debe cuidar que los requerimientos de materia prima, azufre, sean cubiertos. Con esto como premisa, Pequiven dentro de sus planes de desarrollo tiene como objetivo el garantizar la continua operación de la planta de ácido sulfúrico, por lo cual visualiza la construcción de una planta para la fundición del azufre sólido generado en los mejoradores de crudo en Anzoátegui, generando valor dentro del país ya que éste es actualmente exportado.

La nueva planta de ácido sulfúrico que está en construcción fue diseñada contando con la disponibilidad y especificaciones del azufre líquido producido en Paraguaná, sin embargo este azufre no cubre los requerimientos de la misma, con un descenso en la tasa de operación de la planta de ácido sulfúrico, por falta en el abastecimiento de la materia prima, se afectaría la cadena de Fertilizantes considerablemente. Por otro lado, la generación de azufre sólido en Anzoátegui duplica la cantidad que requiere la planta de ácido y puede ser aprovechado con la instalación de una unidad de fundición.

Ahora bien, con esta problemática presente se plantea esta investigación el cual se desarrolla bajo la siguiente metodología: revisión teórica de las propiedades críticas del azufre inherentes al sistema que se pretende diseñar



y de los ensayos contemplados en las diferentes normas para determinar posteriormente las mismas, sobre las muestras provenientes de dos mejoradores de azufre. Luego se realiza la configuración inicial de los equipos principales y secundarios, que servirá adicionalmente como insumo para la obtención de los parámetros de diseño del sistema de fundición y almacenamiento a través de un paquete tecnológico. Finalmente se analizan los resultados para mejorar el esquema planteado, indicar las especificaciones de los equipos principales y determinar la factibilidad económica de la propuesta.

El presente trabajo se estructura en cuatro capítulos. En el capítulo I se realiza el planteamiento del problema, así como también los objetivos que se desarrollan para la solución del mismo. En el capítulo II se presenta el marco teórico de la investigación. En el capítulo III se expone el marco metodológico, que explica en forma secuencial, la estrategia empleada para el logro de los objetivos. En el capítulo IV se muestran los resultados obtenidos durante el desarrollo de los objetivos y la discusión respectiva, y finalmente se demuestran las conclusiones y recomendaciones de la investigación.



CAPÍTULO I

EL PROBLEMA DE LA INVESTIGACIÓN

En este capítulo se presentan el planteamiento del problema, su formulación, los objetivos de la investigación, la justificación y las limitaciones de la misma.

1.1. Planteamiento del problema

Pequiven es una Corporación encargada de producir y comercializar productos Petroquímicos fundamentales con prioridad hacia el mercado nacional y con capacidad de exportación; esta empresa propicia la creación de empresas mixtas, estimula el desarrollo agrícola e industrial de las cadenas productivas y promueve el equilibrio social con alta sensibilidad comunitaria y ecológica. Adicionalmente ofrece a los mercados nacional e internacional más de 40 productos petroquímicos con proyección de aumento según el Plan de desarrollo planteado en el año 2006 que incluye decenas de proyectos.

Su visión internacional del negocio y la vinculación con importantes socios en la conformación de las empresas mixtas le ha permitido consolidar una importante presencia en los mercados de la región, así como en otras partes del mundo y afianzar sus cadenas productivas con miras a la ampliación y diversificación. La empresa cuenta con tres líneas de negocios: Productos Industriales, Fertilizantes y Olefinas y Plásticos. En el municipio Morón se encuentra el mayor desarrollo de la empresa en materia de Fertilizantes con capacidad instalada actual de 1.660 MTMA (miles de toneladas métricas) de Fertilizantes nitrogenados y fosfatados y para el año 2013 contará con una capacidad de 3.502 MTMA.



A partir del gas natural, el azufre y la roca fosfática se desarrollan líneas de productos intermedios y terminados estratégicos, cuyos usos están asociados con la vida diaria de la población; la producción es destinada básicamente a la manufactura de urea, SAM (sulfato de amonio) y fertilizantes granulados NPK/NP.

Entre los proyectos contemplados en Morón se tiene el correspondiente a una planta de ácido sulfúrico (98,5 %) con una capacidad de 990 MTMA, cuya producción estará destinada a reforzar la cadena de fertilizantes nitrogenados y fosfatados en el país. El insumo principal de esta planta es azufre líquido. El diseño de la planta contempla un rendimiento de la conversión igual a 99,73 %; entre las unidades de proceso se tienen: la recepción, filtrado y almacenamiento de azufre, combustión de azufre, sistema de recuperación de calor, sistema de ácido fuerte (torres de secado y absorción), sistema de conversión, precalentamiento y almacenamiento del producto final.

El consumo de azufre líquido por diseño para la planta de ácido sulfúrico es igual a 1000 toneladas diarias y se tiene previsto que parte de esta cantidad provenga de una refinería en Paraguaná que cuenta con una capacidad instalada igual a 900 toneladas diarias. De la cantidad disponible de azufre líquido en Paraguaná, se destina cierta cantidad para una empresa privada que desarrolla también la cadena de fertilizantes, por lo que el total del requerimiento para la producción de ácido sulfúrico en Morón no sería cubierto en su totalidad. Cabe destacar que la planta planea iniciar sus operaciones con 40 % de la capacidad instalada aproximadamente mientras es culminado un proyecto aguas abajo que demandaría el 60 % restante de ácido sulfúrico; tomando en cuenta esta consideración, el requerimiento de azufre inicialmente sería igual a 400 toneladas diarias y puede ser cubierto



en su totalidad por la refinería de Paraguaná; ahora bien, suponiendo que para el momento en el cual se aumente la capacidad de la planta de sulfúrico, se pueda disponer de toda la oferta de azufre líquido en Paraguaná, existiría al menos un déficit de 100 toneladas diarias (33 MTMA) de azufre líquido.

En Anzoátegui existen cuatro Mejoradores de crudo que producen en conjunto 2.200 toneladas diarias de azufre sólido, producto que actualmente no es transformado y representa un pasivo ambiental en el país. Las características generales de este azufre se muestran en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1. Características del azufre sólido obtenido en un mejorador de crudo pesado en Anzoátegui

Pureza del azufre	99,8 % en peso
Color	Amarillo Brillante
Forma	Esférico
Tamaño	3 a 5 mm
Temperatura de Descarga del Azufre	< 140 °F

Fuente: PDVSA, 2009.

En vista de la disponibilidad de azufre sólido en Anzoátegui y el futuro déficit en la demanda de azufre líquido debido a los compromisos en el suministro del mismo se procura diseñar un sistema de fundición y almacenamiento del azufre sólido para cumplir con la producción estimada de ácido sulfúrico en el proyecto y apoyar la cadena de fertilizantes fosfatados en el país.



1.2. Formulación del problema

Se tiene previsto que la futura producción de ácido sulfúrico en Morón atienda las necesidades de este producto en la cadena de Fertilizantes que a la vez mantiene el sector agrícola y alimenticio del país. Dicha producción depende principalmente de la disponibilidad de azufre líquido en el país. De acuerdo a los requerimientos de materia prima para la planta, existe un déficit en la disponibilidad de azufre en Paraguaná, sin embargo hay una producción importante de azufre sólido en Anzoátegui que no se transforma en Venezuela y se ha convertido en un pasivo ambiental los últimos años.

Tomando en cuenta lo antes descrito, se plantea la siguiente interrogante: *¿Será posible diseñar un sistema de fundición y almacenamiento del azufre sólido proveniente de Anzoátegui para completar la alimentación de la futura planta de ácido sulfúrico ubicada en Morón?*

1.3. Objetivos de la investigación

1.3.1. Objetivo general

Diseñar un sistema de fundición y almacenamiento del azufre sólido proveniente de los mejoradores de crudo de Anzoátegui para alimentar una planta de ácido sulfúrico en Morón, estado Carabobo.

1.3.2. Objetivos específicos

1. Determinar las características químicas y físicas críticas para el diseño del sistema de fundición de azufre sólido proveniente de los mejoradores de crudo en Anzoátegui.
2. Determinar los parámetros de diseño del sistema de fundición del azufre sólido proveniente de los mejoradores de crudo en Anzoátegui.
3. Diseñar un sistema de almacenamiento capaz de recolectar el azufre fundido proveniente de la unidad de fundición.



4. Proponer la instrumentación básica del sistema de fundición y almacenamiento del azufre fundido que será alimentado a la planta de ácido sulfúrico ubicada en Morón, estado Carabobo.
5. Establecer las hojas de especificaciones de los equipos principales del sistema de fundición y almacenamiento de azufre líquido.
6. Estimar los costos de la propuesta para determinar la factibilidad de su implementación.

1.4. Justificación

La planta de ácido sulfúrico se diseñó contando con la disponibilidad y especificaciones del azufre líquido producido en Paraguaná, sin embargo dicha disponibilidad se encuentra en déficit con respecto a los requerimientos de la planta debido a otros compromisos actuales en el suministro. Con un descenso en la tasa de operación de la planta de ácido sulfúrico, por falta en el abastecimiento de la materia prima, se afectaría la cadena de Fertilizantes y a la vez el sector agrícola y alimenticio del país.

En Anzoátegui existe una generación importante de azufre sólido y su presencia se ha convertido en un pasivo ambiental estos últimos años, debido a que no se ha podido aprovechar en otros desarrollos. Esto impulsa la utilización del azufre y la generación de valor sobre el mismo, alineado también con los principios de conservación ambiental y del entorno en los cuales se desenvuelve la empresa patrocinante.

Adicionalmente se cuenta con la información teórica y el apoyo por parte de la empresa necesaria para desarrollar la investigación en cuanto a materiales, información estadística, equipos, reactivos y otros, lo que beneficia el desarrollo consecuente de la metodología planteada para culminar con éxito la investigación.



Desde el punto de vista académico, esta investigación sirve como base para investigaciones posteriores y aporta conocimientos importantes en cuanto al sector petroquímico del país.

Finalmente con esta investigación se quieren adquirir conocimientos, técnicas y procedimientos que favorezcan el desarrollo profesional del autor, sirviendo como experiencia para los siguientes desafíos que se puedan presentar a lo largo de toda el desempeño profesional.

1.5. Limitaciones

Una de las limitaciones más relevantes es la confidencialidad de la información manejada y utilizada, ya que la empresa debe mantener una cierta privacidad con respecto a sus procesos lo que conlleva a que se pudieran encontrar algunas restricciones limitando así la correcta ejecución de la investigación, de modo que se retrase el tiempo de culminación de la misma.

1.6. Alcance

La presente investigación contempla el diseño de un sistema de fundición y almacenamiento de azufre en Morón para ser alimentado a una futura planta de ácido sulfúrico en el mismo sitio y la estimación del costo beneficio de la propuesta. Para efectos de la investigación no se considera el traslado del azufre sólido desde Anzoátegui hasta Morón ni el diseño del transporte de azufre fundido desde el sistema de almacenamiento hasta la planta de ácido sulfúrico.



CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

En este capítulo se enumeran una serie de investigaciones previas 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.

2.1 Antecedentes

Según **Abdel-Mohsen O. Mohamed y Maisa El Gamal (2007)**, los usos existentes del Azufre están relativamente avanzados, a pesar de que existen oportunidades limitadas para consumir los nuevos suministros. Actualmente, el balance de Azufre a nivel mundial muestra un excedente considerable, y con las regulaciones ambientales existentes una mayor cantidad de Azufre es recuperada a partir del procesamiento de petróleo y gas. Adicionalmente se prevé que existan excedentes en la oferta de Azufre para el corto plazo y los precios de Azufre se estiman que estén bajo presión ocasionando efectos negativos para los productores. Por consiguiente, es necesario conseguir nuevos mercados para el aprovechamiento del Azufre. Un mercado potencial está en la producción de concreto a partir de Azufre sólido; éste es un compuesto termoplástico de agregados minerales modificados unidos químicamente, tomando en cuenta la adición de Azufre.

El producto final es más duradero que el tradicional cemento Pórtland. Pueden existir beneficios económicos en la reducción del efecto invernadero que aumentarían el atractivo del uso de Azufre Sólido en el cemento. El objetivo principal del estudio fue evaluar experimentalmente el potencial uso del Azufre como un agente en la solidificación de residuos peligroso. Para lograr este objetivo, se revisó la literatura en cuanto al concreto con contenido de Azufre, se analizó la disponibilidad



de Azufre local, se evaluó un número de polímeros modificados con Azufre y agentes de estabilización física, se diseñaron ciertos experimentos y se evaluó el producto obtenido según sus propiedades mecánico-químicas. El resultado indica que la manufactura de cemento con Azufre sólido es un buen candidato para prácticas de manejo de desperdicios como es el caso de la solidificación y estabilización de desperdicios peligrosos; sistemas de barreras para el vertido de residuos peligrosos y la planta de tratamiento de aguas residuales.

En el estudio de **James R. Lyons (2008)**, se expone la presencia de los isótopos de Azufre. Las presiones de vapor de los isótopos de azufre, especialmente S_2 , S_3 y S_4 , son suficientemente conocidas a las temperaturas de la atmósfera, pero generalmente se asumen que son muy altas y representan una significativa influencia en la fase gaseosa cuando se elaboran modelos de cálculos. En este trabajo se presentan las estimaciones de la influencia de la presión de vapor de equilibrio sobre el Azufre sólido y parece dar a entender que las presiones de vapor de la mayoría de los isótopos son demasiado bajas a temperaturas atmosféricas típicas, como para que sean influyentes en las reacciones de formación de la fase gaseosa. El resultado más resaltante de este estudio es que la baja presión de vapor del Azufre en Azufre sólido, junto con presiones de vapor de equilibrio de isótopos de Azufre en Azufre líquido a temperaturas más bajas, a escala, sostiene que las presiones de vapor de equilibrio de isótopos de baja masa en Azufre sólido son muy bajas.

En la investigación de **Hongshuai Gao y Otros (2009)**, se identificaron los líquidos iónicos como agentes altamente selectivos para la extracción de compuestos aromáticos de Azufre de los combustibles a temperatura ambiente. La eficiencia de los líquidos para la eliminación de compuestos aromáticos de azufre depende de las propiedades y la estructura de los mismos. En este trabajo, el líquido iónico (ácido de Lewis) 1-Butil-3-



Metilimidazolio, Tetracloruro de Hierro (III) ([BMIN][FeCl₄]) fue sintetizado y demostró mayor eficacia en la eliminación de compuestos aromáticos de Azufre del diesel con respecto a los líquidos iónicos: 1-Butil-3-Metilimidazolio, Hexafluorofosfato ([BMIM][PF₆]) y 1-Butil-3-Metilimidazolio, Tetrafluoroborato ([BMIM][BF₄]) debido a su propiedad de ácido de Lewis. Los líquidos iónicos favorecen la extracción de compuestos orgánicos con mayor densidad de electrones “pi”. El líquido ([BMIN][FeCl₄]) puede ser regenerado a través de la extracción con Hexano, y podría ser utilizado en múltiples pasos para la eliminación de compuestos de Azufre a partir del Diesel.

ZareNezhad, Bahman (2008) en su investigación explicó que en el procesamiento de gas natural amargo, la conversión de Sulfuro de Hidrógeno (H₂S) en Azufre elemental a menudo se realiza en una unidad Claus modificada. A medida que las instalaciones de procesamiento de hidrocarburos aumenten el uso de materias primas más agrias (con alta concentración de Azufre), las unidades Claus deben procesar mayores cantidades de H₂S. El parámetro que mayor influencia ejerce sobre la recuperación de Azufre es la selección del catalizador de la unidad Claus; para lo cual se toma en cuenta: el tamaño del poro y la distribución del mismo, la forma, el volumen, la densidad, la resistencia mecánica y la resistencia al desgaste de las partículas. El resultado de este trabajo menciona que las características antes descritas son parámetros fundamentales que deben ser considerados en los desarrollos de nuevos catalizadores y así obtener mejoras de recuperación de azufre.

Rasmus Hansson (2010), elaboró un modelo de simulación de un humidificador y una torre de absorción con la finalidad de investigar hasta qué punto la producción de calor se podría aumentar en una planta de Ácido Sulfúrico. Los resultados muestran que si el caudal de agua actual de 48 m³ / h se incrementa a 248 m³ / h, la producción de calor en las



torres de secado se aumenta en 1,53 MW. También se investigó cómo se incrementa la producción de calor si el flujo de aire a través del humidificador se amplía y si se adiciona otro humidificador. Cuando el flujo de aire se incrementa, la producción de calor aumenta 1.78 MW; si el área del humidificador se incrementa en un factor de dos, el aumento de la producción de calor es 2,84 MW. Con las simulaciones se demuestra que la temperatura de entrada de aire y de agua tiene una gran influencia en la producción de calor en una planta de Ácido Sulfúrico.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Azufre

El azufre es un mineral amarillo suave que 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 (Suresh, 2009).

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 (Suresh, 2009).

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 (Suresh, 2009).

A pesar de que la cinética real de oxidación es compleja, la reacción global se puede representar como:



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.

El Azufre no es considerado como un material peligroso para el ambiente. Puede ser almacenado fácilmente en grandes pilas, de forma libre. El principal problema del medio ambiente que rodea el Azufre es su control en la contaminación del aire; para esto existen regulaciones que limitan la liberación de Azufre en productos tales como Dióxido de Azufre, el contenido en el petróleo, gas natural y minerales y lo liberado a la atmósfera si la materia prima que contiene el Azufre es quemada (Suresh, 2009).

2.2.2. Ácido Sulfúrico

El Ácido Sulfúrico es una de las sustancias químicas más utilizadas en la actualidad. Presenta aplicaciones en la industria de fertilizantes



fosfatados, en la industria del petróleo, en la producción de pigmentos, producción de plásticos, papel, otros (Müller, 2005).

Es un ácido fuerte, y se presenta físicamente como un líquido aceitoso, puede ser claro, turbio o fumante dependiendo de la concentración y la calidad. La fórmula química es H_2SO_4 , el peso molecular es 98,08 y el contenido de Azufre es igual a 0,3269. Éste ácido se encuentra disponible en una serie de concentraciones y calidades. A bajas concentraciones, generalmente el ácido se mide en grados Baumé (°Bé) , lo que se refiere a la gravedad específica del producto. Las concentraciones entre 93 y 100% del ácido representan generalmente al porcentaje en peso del ácido. La mayor parte del ácido se vende con 66 °Bé (Suresh, 2009).

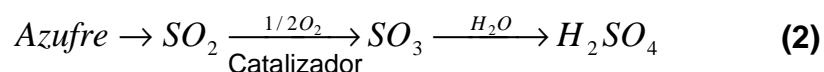
Es uno de los productos con mayor volumen en la industria química. La producción de materias primas para los fertilizantes fosfatados, especialmente el Ácido Fosfórico, es el principal mercado del Ácido Sulfúrico, representando casi el 53% del consumo mundial en el año 2008. El Ácido Sulfúrico tiene una amplia variedad de aplicaciones industriales y técnicas. Su amplio uso en estas funciones se debe en gran parte a su bajo costo. Se usa generalmente como un producto químico dentro de un proceso, es decir, como agente generador de acidez, catalizador, agente deshidratante y otros; debido a que éste no es consumido principalmente como un reactivo, cantidades sustanciales de residuos ácidos contaminados y sales de sulfato permanecen como subproductos dentro de varios procesos. Algunos residuos ácidos pueden ser reutilizados o utilizados como materia prima en las plantas de Ácido Sulfúrico (Suresh, 2009).

2.2.3. Producción de Ácido Sulfúrico

El proceso productivo más utilizado para obtener Ácido Sulfúrico es el de contacto y se puede dividir en tres etapas principales: la producción de



Dióxido de Azufre (SO_2), la oxidación catalítica del SO_2 a Trióxido de Azufre (SO_3) y la reacción de SO_3 con agua mediante la absorción en Ácido Sulfúrico concentrado. Cuando el líquido de Azufre se quema para formar SO_2 , se liberan grandes cantidades de calor que se utilizan para producir vapor de alta presión. Según estas etapas la reacción para la formación de Ácido Sulfúrico es la siguiente:



Cuando el Azufre elemental es utilizado como materia prima, los tres pasos descritos anteriormente se dan en condiciones exotérmicas. La generación de calor se ha convertido en una característica importante en el diseño de las nuevas plantas y en la economía de producción (Müller, 2005).

2.2.4. Transferencia de calor

Prácticamente en todas las operaciones que realiza el ingeniero químico 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, tienen una gran importancia (McCabe y Otros, 2007).

2.2.4.1. 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.

Conducción. Si existe un gradiente de temperatura en una sustancia, el calor fluye sin que tenga lugar un movimiento observable de la materia.



El flujo de calor de este tipo recibe el nombre de conducción, y de acuerdo con la Ley de Fourier, el flujo de calor es proporcional al gradiente de la temperatura y de signo opuesto. Para el flujo de calor en una dimensión, la Ley de Fourier es:

$$\frac{dq}{dA} = -k \frac{dT}{dx} \quad (3)$$

Donde: q = velocidad del flujo de calor en dirección normal a la superficie

A = área de la superficie

T = temperatura

x = distancia normal a la superficie

k = constante de proporcionalidad o conductividad térmica (McCabe y Otros, 2007).

En los metales, la conducción térmica resulta del movimiento de los electrones libres y existe una estrecha relación entre la conductividad térmica y la conductividad eléctrica.

En los sólidos que son malos conductores de la electricidad, y en la mayor parte de los líquidos, la conducción térmica se debe a la transferencia de la cantidad de movimiento entre las moléculas o átomos adyacentes que vibran. En gases, la conducción se produce por el movimiento al azar de las moléculas, de forma que el calor se “difunde” desde regiones más calientes hacia otras más frías. El ejemplo más común de conducción pura es el flujo de calor en sólidos opacos, tales como la pared de ladrillo de un horno o la pared metálica de un tubo intercambiador de calor. Con frecuencia, la conducción de calor en líquidos o gases se ve influida por el flujo de los fluidos, y los procesos conductivo y convectivo están enlazados bajo el término de convección o transferencia de calor convectiva (McCabe y Otros, 2007).



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, como se establece en la Ley de Newton de enfriamiento:

$$\frac{q}{A} = h(T_s - T_f) \quad (4)$$

Donde T_s = temperatura de la superficie

T_f = temperatura global del fluido, más allá de la superficie

h = coeficiente de transferencia de calor (McCabe y Otros, 2007).

Observe que la dependencia lineal de la fuerza impulsora de la temperatura ($T_s - T_f$) es la misma que para la conducción pura en un sólido con conductividad térmica constante. A diferencia de la conductividad térmica, el coeficiente de transferencia de calor no es una propiedad intrínseca del fluido, sino que depende tanto de los patrones de flujo determinados por la mecánica de fluidos como de las propiedades térmicas del fluido. Si $(T_s - T_f) > 0$, el calor será transferido del fluido a la superficie (McCabe y Otros, 2007).

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 (McCabe y Otros, 2007).

Radiación. Radiación es el término que se emplea para designar a la transferencia de energía a través del espacio por medio de ondas electromagnéticas. Si la radiación pasa a través de un espacio vacío, no se transforma en calor ni en otra forma de energía, ni se desvía de su trayectoria. Sin embargo, si en su trayectoria encuentra algún material, la radiación se transferirá, reflejará o absorberá. Sólo la energía absorbida es la que aparece como calor y esta transformación es cuantitativa. Por ejemplo, el cuarzo fundido transfiere prácticamente toda la radiación que incide sobre él; una superficie opaca pulida o un espejo reflejan la mayor parte de la radiación incidente; una superficie negra o mate absorbe la mayor parte de la radiación que recibe y la energía absorbida es transformada cuantitativamente en calor. La energía emitida por un cuerpo negro es proporcional a la temperatura absoluta elevada a la cuarta potencia:

$$W_b = \sigma T^4 \quad (5)$$

Donde W_b = velocidad de emisión de energía radiante por unidad de área

σ = constante de Stefan-Boltzman

T = temperatura absoluta (McCabe y Otros, 2007).

2.2.4.2. Intercambiadores de calor para Sólidos

Los equipos de transferencia de calor en modalidad directa se construyen de tal modo que la carga de sólidos se separa del medio portador de calor mediante una pared; las dos fases no están nunca en contacto directo. La transferencia de calor se hace por conducción, basada en las leyes de la difusión.



Algunos de los dispositivos que se describen a continuación manejan la carga de sólidos en un lecho estático o de flujo laminar. Otros se pueden considerar como calderas de agitación continua en su aspecto de transferencia de calor. Para estos últimos, los índices de desempeño por unidad de área son más altos.

En el procesamiento térmico de sólidos con equipos indirectos, los ingenieros deben recordar que la capacidad de transferencia de calor de la pared es de muchas veces la de la carga de sólidos. Por ende, las propiedades de los sólidos y la geometría del lecho rigen el índice de transferencia de calor (Perry y Otros, 2006).

2.2.4.2.1. Equipos para solidificación

Una operación frecuente en el campo de la química es la eliminación de calor de un material en estado de fusión para efectuar su conversión al estado sólido. Cuando la operación se lleva a cabo por lotes, se denomina vaciado; pero cuando se realiza continuamente, recibe el nombre de formación de escamas.

Debido a las variaciones rápidas de temperatura y transferencia de calor, los tipos encamisados se limitan a una temperatura de fusión inicial de 232 °C (450 °F). Las temperaturas más altas, 316 °C (hasta 600 °F) requieren un cuidado extremo en el diseño de las camisas y en el patrón de flujo del líquido de enfriamiento. Se obtiene un mejor desempeño y una capacidad mayor mediante 1) el mantenimiento del preenfriamiento en un mínimo y 2) la optimización del espesor de la torta. Esto último no siempre se puede hacer desde el punto de vista de la transferencia de calor, puesto que las especificaciones del producto final pueden dictar su espesor. Se pueden mencionar los siguientes equipos para solidificación: tipo de mesa, tipo de bandeja agitada, tipo vibratorio, tipo de banda,



banda metálica sumergida, tambor giratorio, tipo de anaquel giratorio, entre otros (Perry y Otros, 2006).

2.2.4.2.2. Equipos para fusión

En este caso, el servicio térmico es el opuesto al de las operaciones de solidificación. El equipo apropiado de la transferencia indirecta de calor para una operación no necesariamente será adecuado para la otra, debido al manejo de materiales más que a los aspectos térmicos. El hecho de si la temperatura de transformación es definida o se encuentra dentro de una gama tiene poca importancia en la selección de equipos para fusión. La carga se agita mucho, pero los lechos son profundos. Solo se pueden esperar valores apropiados para el coeficiente global, aunque los valores del flujo de calor sean buenos. A continuación se presentan las características de algunos de estos equipos:

- **Tipo de tanque horizontal:** Este tipo se utiliza para transferir calor con el fin de fundir o cocer sólidos secos en polvo.
- **Tipo de caldera vertical agitada:** Este tipo se utiliza para cocer, fundir y proporcionar o retirar calor de reacción para sólidos que varían considerablemente en su “cuerpo” durante el proceso, de modo que el manejo del material es un problema real. Las virtudes son la sencillez y la facilidad de limpieza al 100%. Esas características superan con frecuencia el aspecto poco favorable de la transferencia de calor. Esos dispositivos existen en tamaños que van desde el tipo encamisado pequeño hasta los gigantescos tazones de hierro colado, de combustión directa por debajo, para la calcinación de yeso. Los límites de temperatura varían con la construcción; las camisas más sencillas permiten temperaturas de hasta 371 °C (700 °F), lo que no es válido en todos los equipos encamisados.



- **Tipo de molino:** Se trata de un dispositivo de potencia y, a la vez, para la transferencia indirecta de calor, que se utiliza para amasar y calentar una mezcla de ingredientes sólidos y secos en polvo, con el fin de hacerlos reaccionar y reformarlos mediante la fusión, para obtener un producto consolidado. En esta operación de composición, el calor de fricción generado por el amasado puede requerir la inversión del flujo de calor (mediante el enfriamiento). Las consideraciones de control del flujo de calor y el nivel de temperatura predominan con frecuencia sobre el rendimiento de transferencia de calor. Más importantes que la transferencia de calor son las consideraciones de potencia y mezclado. El molino de dos rodillos se emplea para formar plásticos brutos, caucho y elastómeros similares al caucho, además de goma o hule. Los molinos de rodillos múltiples sin cuchillas se utilizan para la producción de películas o láminas continuas en anchuras de hasta 2,3 m (7,7 ft). Se utilizan equipos similares para la producción química de tintas, tintes, pigmentos para pinturas y productos semejantes (Perry y Otros, 2006).

2.2.4.2.3. Equipos de transferencia de calor para sólidos divididos

La mayor parte de los equipos para este servicio son una adaptación de un dispositivo de manejo de materiales, tanto si se desea la capacidad de transporte como si no es así. El antiguo tubo vertical y la coraza vertical (fluidificador), relativamente nueva, son excepciones. Los problemas de manejo de materiales, las necesidades de transporte en las plantas, la energía eléctrica y el mantenimiento son consideraciones primordiales para la selección de equipos y, con frecuencia, oscurecen las consideraciones de transferencia de calor y costo de capital. En general, el manejo de materiales es el aspecto más importante. Las características de manejo de materiales de los sólidos divididos pueden variar durante el procesamiento térmico. Los cambios del cuerpo suelen ser importantes



para la desecación, a veces para el calentamiento y sólo en raras ocasiones para el enfriamiento. *La capacidad para minimizar los efectos de los cambios es lo más importante en la selección de equipos.* Las operaciones de deshidratación se realizan mejor en aparatos de contacto que proporcionan aire para eliminar el vapor de agua liberado antes de que se desarrolle una forma semilíquida (Perry y Otros, 2006).

Algunos tipos de equipos para la remoción de calor se pueden convertir en dispositivos para el suministro de calor cambiando simplemente el nivel de temperatura del fluido o el aire. Otros tipos requieren un cambio auxiliar. Otros necesitan cambios de construcción. Los límites de temperatura para el equipo varían generalmente con la operación térmica. El tipo de operación térmica tiene un efecto importante en los valores de transferencia de calor. Para la desecación, los coeficientes globales son sustancialmente mayores en presencia de una humedad elevada para el periodo de velocidad constante que en el acabado. Sin embargo, la presencia de un “cuerpo” rígido, debido a la humedad, puede evitar la “mezcla” normal, con efectos adversos sobre el coeficiente. A continuación se presentan las características de algunos de estos equipos:

- **Tipo de lecho fluidificado:** Se conoce como fluidificador cilíndrico y funciona con un lecho de sólidos fluidificados. Es una versión de transferencia de calor indirecta. Una de las desventajas de su aplicación es la necesidad de la operación por lotes, a menos que se puedan tolerar ciertas derivaciones. Las aplicaciones al enfriamiento de sólidos son escasas, puesto que se pueden realizar en forma más eficiente por medio del gas de fluidificación con un mecanismo de contacto. Las aplicaciones de calentamiento son muchas y muy variadas pero tienen un inconveniente, que es la disipación del calor que entra junto con el gas de fluidificación. El



rendimiento de transferencia de calor en la modalidad indirecta a los sólidos es sobresaliente, con coeficientes globales en el intervalo de 570 a 850 W / (m² * °C).

- **Tipo de lecho móvil:** Este concepto utiliza un haz de tubos de paso simple en una coraza vertical y los sólidos divididos fluyen en los tubos por gravedad. Se emplea poco para sólidos. Una de las principales dificultades en las aplicaciones con sólidos divididos es el problema de la carga y la descarga con uniformidad. La segunda es que tiene índices de transferencia de calor bajos. Debido a esas limitaciones, este tipo de haz de tubos no es tan conveniente para los sólidos como lo es para el intercambio de calor en la fase líquida y de gas.
- **Tipo de bandeja agitada:** No se trata de la adaptación de un dispositivo de manejo de materiales, sino que se desarrolló hace muchos años con fines de transferencia de calor. Como tal, ha tenido aplicaciones muy amplias. A pesar de su funcionamiento por lotes, con costos de mano de obra elevados se utiliza todavía para procesar sólidos divididos, en los que no se produce ningún cambio de fase. Por su sencillez y facilidad de limpieza, esa unidad es adecuada para el manejo de algunas operaciones pequeñas experimentales o, incluso, de producción, donde se procesen térmicamente gran variedad de materiales de carga. Permite tanto el calentamiento como el enfriamiento, pero se ha utilizado principalmente para la desecación.
- **Dispositivos amasadores:** Se relacionan estrechamente con los tipos de bandeja agitada; pero difieren en que son primordialmente dispositivos mezcladores en los que la transferencia de calor es sólo una característica secundaria. La transferencia de calor se realiza gracias a la construcción encamisada del cuerpo principal, y se efectúa por medio de un enfriador, agua caliente o vapor. Esos



dispositivos se pueden aplicar a la combinación de sólidos divididos por acción mecánica, en vez de química.

- **Dispositivos de coraza giratoria:** Se instalan horizontalmente, mientras que las instalaciones de coraza estacionaria son verticales. Los aspectos de manejo de materiales son de mayor importancia que el rendimiento térmico. Habitualmente, los resultados térmicos se dan en función del coeficiente global sobre la base del área total proporcionada, que varía mucho con el diseño. El uso real, principalmente el factor de porcentaje de llenado, varía mucho, lo cual afecta a la confiabilidad de los valores dados para el coeficiente. Esos dispositivos se utilizan para enfriamiento, calentamiento y desecación y son las unidades que más se emplean para el tratamiento térmico de sólidos divididos en la gama de gran capacidad.
- **Dispositivos de transportador en espiral:** Son equipos muy utilizados para el manejo de materiales, con fines de transferencia indirecta de calor. Para estos fines, se puede considerar que esos transportadores son calderas con agitación continua.
- **Dispositivos mezcladores de cono doble:** La finalidad original de estos dispositivos era el mezclado. Se han hecho adaptaciones, por lo que muchos modelos son en la actualidad primordialmente para procesos de transferencia indirecta del calor. Una camisa en la coraza lleva el medio de transferencia de calor. La acción mezcladora que rompe las aglomeraciones (pero causa también cierta degradación) proporciona una exposición muy adecuada de la carga a la superficie de transferencia de calor. En las operaciones de desecación, la liberación del vapor (que en un lecho estático es un proceso lento de difusión) se lleva a cabo con bastante rapidez. Para lograr el retiro de vapor de la cámara de carga se utiliza un eje hueco. En muchos de esos dispositivos se lleva el eje hueco un poco más lejos al agregar un sello giratorio y



crear un vacío. Esto aumenta considerablemente el rendimiento térmico y hace que la unidad sea muy apropiada para las operaciones de recuperación de disolventes.

- **Dispositivos de transportador vibratorio:** Estas adaptaciones de transferencia indirecta de calor son sencillas, de construcción segura, no producen degradación, no tienen polvo ni desgaste, se puede hacer variar con facilidad su velocidad de transporte y poseen un buen coeficiente de transferencia de calor. Por lo común, requieren accesorios de distribución y alimentación. Son apropiadas para el calentamiento o enfriamiento de sólidos divididos en forma pulverizada, granulada o húmeda, pero no pegajosa, licuada o inundante.
- **Dispositivos elevadores:** El tipo vibratorio de espiral elevadora adapta equipos de manejo de materiales que elevan sólidos divididos a servicios de transferencia de calor. Presenta una gran superficie de transferencia de calor sobre un espacio pequeño de terreno y emplea un movimiento alterno de agitación para efectuar el transporte. Las aplicaciones, las profundidades de las capas y las capacidades están limitadas, puesto que las cargas deben poseer características corporales que permitan que se transporten hacia arriba por el principio de microcangilones. Carece de capacidad de autovaciado. La limpieza y el lavado completo es una característica que no se encuentra en ningún otro dispositivo elevador.
- **Dispositivos de transporte neumático:** Se utilizan primordialmente con fines de transporte y la transferencia de calor es una consideración muy secundaria. Se han aplicado primordialmente para plásticos en polvo y en forma de granulado o perdigones. Mediante modificaciones, se han llevado a cabo las operaciones necesarias para el enfriamiento al mismo tiempo que las de transporte hacia el almacenamiento (Perry y Otros, 2006).

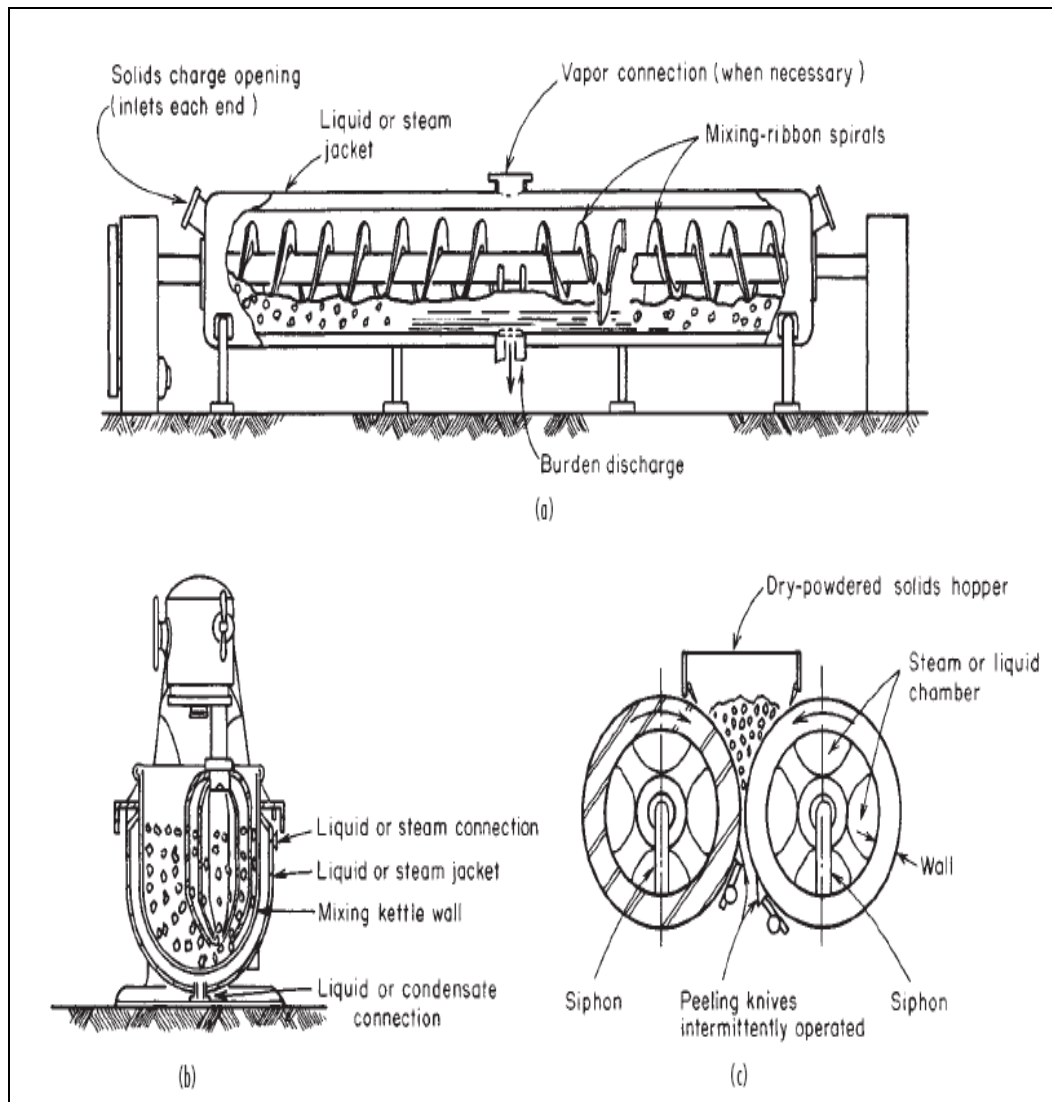


Figura 2.1. Equipos de transferencia de calor para sólidos. (a) Tipo tanque horizontal, (b) Reervidor agitado y (c) Molino de doble tambor.

Fuente: Perry y Otros, 2006.



CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

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.

3.1. Tipo de estudio y de investigación

3.1.1. Tipo de Estudio

Según los objetivos específicos planteados el estudio que se propone es de campo, esto se debe a que la investigación directamente se efectúa en el lugar y el tiempo en el que ocurren los fenómenos objeto de estudio sin manipular variables ni controlarlas. Esta clasificación indica que la investigación se realiza en condiciones naturales y no en un ambiente artificial (Hernández y otros, 1997).

3.1.2. Tipo de Investigación

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. Consiste en la elaboración de una propuesta o de un modelo, para solucionar problemas o necesidades de tipo práctico, ya sea de un grupo social, institución, un área en particular del conocimiento, partiendo de un diagnóstico preciso de las necesidades del momento, los procesos explicativos o generadores involucrados y las tendencias futuras (Hurtado, 1998).

3.2. Diseño de la investigación

La futura producción de ácido sulfúrico en Morón está destinada a cubrir las necesidades de este producto en la cadena de Fertilizantes que a la vez mantiene el sector agrícola y alimenticio del país. Dicha producción depende principalmente de la disponibilidad de azufre líquido en el país,



la cual actualmente está en déficit. Tomando en cuenta lo antes descrito, se pretende diseñar un sistema de fundición y almacenamiento del azufre sólido proveniente de Anzoátegui para completar la alimentación de la futura planta de ácido sulfúrico ubicada en Morón.

Para alcanzar los objetivos planteados en la investigación se presentan las siguientes fases a desarrollar:

- Determinación de las características químicas y físicas críticas para el diseño del sistema de fundición de azufre sólido.
- Calculo de los parámetros de diseño del sistema de fundición del azufre sólido.
- Diseño de un sistema de almacenamiento capaz de recolectar el azufre fundido proveniente de la unidad de fundición.
- Propuesta de la instrumentación básica del sistema de fundición y almacenamiento del azufre fundido que será alimentado a la planta de ácido sulfúrico ubicada en Morón, estado Carabobo.
- Establecimiento de las hojas de especificaciones de los equipos principales del sistema de fundición y almacenamiento de azufre líquido.
- Estimación de los costos de la propuesta para determinar la factibilidad de su implementación.

A continuación se presenta la metodología seguida en cada una de las fases.

3.3. Determinación de las características químicas y físicas críticas para el diseño del sistema de fundición de azufre sólido proveniente de los mejoradores de crudo en Anzoátegui.

En los mejoradores de crudo pesado ó extra pesado se ejecutan una serie de operaciones con la finalidad de agregar valor económico a estos



productos modificando ciertas características críticas de calidad. El mejorador de crudo extra pesado lleva la calidad del crudo desde 8,5 °API hasta 26 °API, mediante la remoción de carbono en forma de Coque, y la disminución de los contaminantes de azufre y nitrógeno. Durante este procedimiento se obtiene una cantidad considerable de azufre la cual es manejada por tres unidades principales: una primera unidad de recuperación de azufre, la unidad de formación de azufre y finalmente la unidad de manejo de azufre.

La recuperación de azufre se refiere básicamente a la conversión del sulfuro de hidrógeno (H_2S) presente en el crudo, en azufre elemental. Para la recuperación se utiliza el proceso Claus, el cual convierte el sulfuro de hidrógeno en azufre durante la fase gaseosa. En la unidad de formación de azufre se procede a solidificar el azufre líquido proveniente de la Unidad de Recuperación de azufre, mediante el uso de una serie enfriadores; en este punto el contenido de humedad es despreciable. Finalmente, la unidad de manejo de azufre, toma las pastillas formadas en la unidad anterior y las envía por correas dentro de recipientes, donde el producto es cargado a camiones móviles, y transportado desde el mejorador al área de almacenamiento del condominio. El azufre en esta última etapa, según las bases de diseño, posee una alta pureza y un contenido de humedad casi despreciable.

Ahora bien, el azufre utilizado para la producción de ácido sulfúrico debe cumplir con ciertas especificaciones, las cuáles se deben mantener durante todo el proceso de fundición con la finalidad de garantizar que la materia prima alimentada a la planta de ácido no genere inconvenientes técnicos durante el proceso.

Para determinar las características críticas asociadas al proceso de fundición de azufre se realizó una investigación extendida de las



especificaciones de materia prima en diferentes procesos para la obtención de ácido sulfúrico y en literaturas técnicas donde este tema ha sido ampliamente desarrollado; con esta investigación se evidencia que las características que tienen un mayor impacto en el proceso son la pureza, el contenido de humedad, la acidez, la presencia de cenizas y el tamaño de partículas.

Una vez identificadas dichas características se continuó con la investigación de los diferentes métodos utilizados para determinar estas, de forma experimental, en muestras de azufre provenientes de los mejoradores de crudo. A continuación se presentan las normas utilizadas para la determinación de dichas características y la metodología descrita en cada una de estas.

La pureza del azufre se determinó empleando la **norma ASTM D4578 – 06**, ésta permite obtener el porcentaje de azufre mediante la extracción de los componentes solubles presentes en la mezcla usando tolueno, para lo cual se mide la muestra inicial y final luego de la extracción; el método permite calcular la cantidad de azufre insoluble presente y con esta la pureza.

Para la determinación de la humedad presente en el azufre, se empleó el **método KARL Fisher (ASTM D1364 - 64)**, el cual es ampliamente usado debido a su alta exactitud y precisión, facilidad de aplicación y tiempo de ejecución, además es útil para la determinación del contenido de agua presente en muestras sólidas; con este método se garantiza la selectividad por el agua y no por otras sustancias volátiles que puedan estar en el sistema. El contenido de humedad se determinó a través de una mezcla de azufre y metanol anhidro en una celda de titulación, ésta se valoró con el reactivo Fisher, disolución estándar de yodo, mediante el uso de un detector potenciométrico.



La acidez del azufre se determinó aplicando la **norma ASTM D4569 – 06**, ésta se utiliza para determinar la acidez en procesos de control de calidad, cubriendo la porción de ácidos presentes que se disocian en agua destilada. La determinación de la acidez se hace incorporando una cantidad determinada de alcohol a la muestra de azufre, posteriormente se agrega un volumen de agua destilada mucho mayor y luego se valora con hidróxido de sodio utilizando azul de bromotimol como indicador, el resultado que se obtiene se reporta como porcentaje de ácido sulfúrico.

El porcentaje de ceniza se determinó mediante la **norma ASTM D856 - 91**, ésta consiste en determinar los residuos de calcinación en una muestra, para lo cual se pesó la muestra de azufre en un crisol previamente tarado y luego de forma lenta se expuso al fuego con un mechero, posteriormente se colocó en el horno a una temperatura entre 600 y 700 °C, hasta la desaparición total del carbo no presente, finalmente se enfrió la muestra y se pesó el residuo. Con estos valores se calcula el porcentaje en peso de la ceniza presente en el azufre.

El tamaño de partícula se determinó haciendo uso de la **norma ASTM D4570 – 02**, con este método se mide el tamaño de partículas requerido para el ingreso en el tanque de fundición, es un método usado en el control de calidad y asegura que con los resultados, las partículas mas grandes no entren al sistema. El método consiste en la obtención del tamaño de partículas a través del uso de un sistema de tamices.

Con esta metodología se realizó la caracterización del azufre almacenado en dos de los cuatro mejoradores de crudo ubicados en Anzoátegui; las pruebas fueron realizadas cada dos meses entre el mes de Noviembre del año 2012 y el mes de marzo del año 2013. En este caso se aplicó un muestreo no probabilístico, debido a que la población presenta características elevadas de homogeneidad. Cabe destacar que se



caracterizó la muestra de acuerdo a la disponibilidad y al acceso que se tuvo dentro de los mejoradores de crudo Anzoátegui.

3.4. Determinación de los parámetros de diseño del sistema de fundición del azufre sólido proveniente de los mejoradores de crudo en Anzoátegui.

Para la determinación de los parámetros de diseño del sistema de fundición de azufre se empleó un paquete tecnológico comercial ampliamente conocido, debido a que posee una amplia base de datos donde se ubican los componentes puros presentes en el sistema y además permite la incorporación de los equipos requeridos en el manejo de sólidos. En todo el sistema no existe reacción química, a pesar de que el programa ofrece estas ventajas, no fue necesario su uso y la selección del mismo fue orientada únicamente a conseguir un modelo que se adaptara a las operaciones unitarias que están presentes en el sistema de fundición.

A continuación se presentan las premisas generales fijadas para la ejecución de la simulación del sistema:

- Título: Simulación fundición de azufre Morón
- Sistema de unidades: Métrico, centígrado y bar.
- Tipo de corrida: Flowsheet, se ejecuta la simulación a partir del PFD de las operaciones y de las corrientes ingresadas por el usuario.
- Paquete termodinámico: el paquete que se adapta más a las condiciones del sistema para la fundición de azufre es Peng-Robinson, seleccionando las ecuaciones de estado como método para determinar las especificaciones de las entalpías (Ver Apéndice A).



Se definieron las características de la corriente de azufre en la alimentación de acuerdo a la caracterización realizada en el primer objetivo de esta investigación, las composiciones en la entrada son en base seca y se incluyeron en la corriente 1 (Ver Apéndice B).

Por otro lado se diseñó la configuración de los diferentes equipos requeridos para ejecutar la fundición del azufre, en este caso se consideraron los siguientes: silo de alimentación del azufre sólido, cinta transportadora del azufre sólido, tanque de fundición de azufre y bomba de azufre fundido.

Luego de haber definido la alimentación y la configuración técnica de los equipos, se procedió a realizar la simulación de todo el sistema; la cual se hizo de forma estacionaria permitiendo que cada una de las etapas alcanzara su convergencia de forma individual.

Con las características del azufre sólido, se pudieron calcular las características de la etapa de almacenamiento y transporte de este material hacia el tanque de fundición, y a partir de los resultados del balance de masa y energía obtenidos en la simulación de cada una de las etapas, se determinaron los parámetros de diseño de los equipos principales.

3.5. Diseño de un sistema de almacenamiento capaz de recolectar el azufre fundido proveniente de la unidad de fundición.

Para la determinación de los parámetros de diseño del sistema de almacenamiento de azufre se empleó el software antes mencionado, ya que éste ofrece excelentes características en el manejo de componentes puros y por la disponibilidad que tiene de equipos similares a los requeridos para el diseño del sistema de almacenamiento.



Las premisas generales consideradas para el diseño y simulación del sistema de almacenamiento son similares a las señaladas en la sección anterior, este sistema está completamente integrado al de fundición.

Con los balances de masa y energía obtenidos durante la simulación del sistema de fundición, con las características bien definidas de la corriente de azufre fundido que sale del tanque de fundición hacia el filtro de azufre y con el diseño de la configuración de los diferentes equipos requeridos para cumplir con el proceso de almacenamiento de azufre fundido, se realizó la simulación del sistema, la cual se hizo de forma estacionaria permitiendo que cada una de las etapas alcanzara su convergencia de forma individual.

Para la determinación de los equipos requeridos durante el proceso de almacenamiento se realizó una investigación exhaustiva de las diferentes configuraciones que existen en la actualidad en cuanto a sistemas de fundición y almacenamiento de azufre.

Con la simulación de todo el sistema se determinaron las características básicas de cada uno de los equipos, las cuales posteriormente fueron afinadas mediante cálculos típicos según la información teórica y práctica asociada a este tipo de procesos. Esta investigación permitió verificar que la información arrojada por el software fuera consistente y lógica.

3.6. Propuesta de la instrumentación básica del sistema de fundición y almacenamiento del azufre fundido que será alimentado a la planta de ácido sulfúrico ubicada en Morón, estado Carabobo.

La propuesta del diagrama de instrumentación y tuberías para el sistema de fundición y almacenamiento de azufre fue realizada de



acuerdo a la normativa interna de la empresa para la preparación de diagramas de proceso y según la metodología indicada en las Normas ISA, en estas se representan los equipos, las tuberías, los instrumentos y la caracterización del diagrama en general. En el procedimiento de ingeniería interno, para la preparación de diagramas de procesos se establecen las pautas que se deben seguir en la elaboración de diagramas de procesos para proyectos totalmente nuevos, modificaciones o remodelaciones de plantas existentes, desde la ingeniería conceptual hasta la ingeniería de detalle (PDVSA, 1991).

Por otro lado, los resultados obtenidos durante la determinación de los parámetros de diseño del sistema de fundición y almacenamiento de azufre, partiendo del diagrama de procesos, sirvieron de base para elaborar la propuesta de instrumentación básica de este sistema en particular.

Para la preparación del diagrama se consideraron las etapas principales, ciertos detalles mecánicos de los equipos, tuberías y válvulas, instrumentos de medición, así como también los lazos de control que van a garantizar la operación segura de la planta.

En el caso de los equipos se identificó el nombre, el código y las características de diseño obtenidas según la simulación y los cálculos realizados durante la determinación del diseño. Para las tuberías de procesos y servicios se identificó el diámetro nominal, tipo de servicio, número de línea, especificación del material y aislamiento, ciertas especificaciones y la dirección del flujo. Para la representación de los sistemas de control se identificaron los instrumentos asociadas a cada lazo de control, con las variables involucradas en cada uno de estos lazos.



3.7. Establecimiento de las hojas de especificaciones de los equipos principales del sistema de fundición y almacenamiento de azufre líquido.

Para la elaboración de las hojas de especificación de los equipos principales, se realizó una investigación de los formatos empleados internacionalmente con la finalidad de seleccionar el formato que permitiera agrupar y exponer de forma clara las características de los equipos, determinadas mediante la simulación y los cálculos realizados durante el diseño del sistema.

El formato consta de una tabla donde se reflejan todos los parámetros de diseño determinados según la simulación del sistema de fundición y almacenamiento de azufre y los diferentes cálculos realizados, la información presentada está compuesta por el nombre del equipo, el código, la descripción de las funciones, las características generales, las condiciones de operación, las especificaciones de diseño, los materiales propuestos para su construcción, y otros detalles de importancia según la particularidad de cada equipo.

3.8. Estimación de los costos de la propuesta para determinar la factibilidad de su implementación.

Inicialmente se realizó la estimación de costos de los equipos principales en base a la información referencial obtenida del área de estimación de costos de la empresa. Debido a que los costos suministrados eran referenciales, con dimensiones diferentes a los equipos diseñados durante esta investigación y además de años pasados (años 1995 y 2007), se realizó una actualización de los mismos con los índices de costos de plantas publicados en la revista “*Chemical Engineering*” y simultáneamente se ajustaron los costos a las



dimensiones diseñadas, utilizando la ecuación de escalamiento (Peters y Timmerhaus, 1.991).

El costo total del proyecto se determinó en base a la metodología propuesta por W.E Hand (Amos, 2007), donde se indican diferentes factores para determinar los costos directos (DFC) de acuerdo a las características particulares de los equipos principales, posteriormente se obtienen los costos directos de labor (DFL) y los costos directos de material (DFM) como un 25% y 75% del DFC respectivamente; los costos indirectos del proyecto se obtienen con un factor del 115% sobre los DFL, los costos de oficina como un 30% de los DFC y además se incluyen los gastos por contingencia y arranque como 15% y 3% sobre los costos directos y de oficina y sobre los DFC respectivamente. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 4.15 (mayor detalle en Apéndice HH).

La inversión total obtenida con el procedimiento antes indicado es para una planta construida e instalada en la Costa del Golfo de Estados Unidos, debido a esto fue necesario realizar una adaptación del monto con el factor de localización apropiado para Venezuela, de acuerdo a la metodología aplicada en la empresa este factor está entre 1,4 y 1,6 del valor obtenido. Para este caso, como premisa, se adoptó el valor de 1,5 (Tabla 4.15).

La estimación realizada para evaluar la factibilidad económica de esta investigación se limita a la evaluación del orden de magnitud de la inversión de la propuesta, la exactitud puede variar en $\pm 30\%$ del valor obtenido (Peters y Timmerhaus, 1.991), es un estimado clase V y aplica cuando el proyecto se encuentra en su primera fase.

Una vez obtenida la inversión del proyecto, se procedió a realizar una evaluación económica y así determinar la factibilidad financiera de la



propuesta a implementar, considerando a su vez ciertos aspectos y premisas con la finalidad de garantizar que los valores obtenidos a través de los modelos de evaluación fueran precisos y consistentes.

La evaluación económica se realizó haciendo uso de hojas de cálculo utilizadas en la empresa. En estas hojas se especificaron los datos de la inversión, las premisas generales y financieras, y datos de interés para la implementación del proyecto. Con esta información se pudo obtener de forma práctica toda la información económica requerida para la evaluación de factibilidad, como lo son los costos de operación, los ingresos brutos, el flujo de caja libre, los indicadores de rentabilidad, los análisis de sensibilidad, entre otros.



CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

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

4.1. Determinación de las características químicas y físicas críticas para el diseño del sistema de fundición de azufre sólido proveniente de los mejoradores de crudo en Anzoátegui.

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 0,5 % 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 esta 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 0,002 % 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.

Tabla 4.1. Especificaciones fisicoquímicas que debe cumplir el azufre fundido en la alimentación de una planta de ácido sulfúrico

Especificación	Valor
Pureza (%p/p)	Mínimo 99,9
Humedad (%p/p)	Máximo 0,5
Acidez (%p/p H ₂ SO ₄ / H ₂ S)	Máximo 0,002
Ceniza (%p/p)	Máximo 0,01
Tamaño (mm)	Máximo 5

Fuente: PETROQUÍMICA DE VENEZUELA, S.A. (2009).

Teniendo presente las características fisicoquímicas críticas antes mencionadas, se realizó la caracterización del producto almacenado cada dos meses durante 6 meses. Los resultados obtenidos son los siguientes:

Tabla 4.2. Características del azufre sólido obtenido en el Mejorador 1 de Anzoátegui

Característica	Noviembre 2012	Enero 2013	Marzo 2013	Promedio Aritmético	Norma
Pureza del Azufre (%p/p)	99,90	99,92	99,91	99,9100	ASTM D4578 - 06
Humedad (%p/p)	0,10	0,09	0,10	0,0960	Método KARL Fisher / ASTM D1364-64

Tabla 4.2. Características del azufre sólido obtenido en el Mejorador 1 de Anzoátegui (Cont.)

Característica	Noviembre 2012	Enero 2013	Marzo 2013	Promedio Aritmético	Norma
Acidez (%p/p H ₂ SO ₄ / H ₂ S)	0,001	0,002	0,002	0,0016	ASTM D4569 - 06
Ceniza (%p/p)	0,005	0,004	0,005	0,0046	ASTM D856 - 91
Tamaño (mm)	3,2	3,3	3,2	3,2300	ASTM D4570 - 02

Tabla 4.3. Características del azufre sólido obtenido en el Mejorador 2 de Anzoátegui

Característica	Noviembre 2012	Enero 2013	Marzo 2013	Promedio Aritmético	Norma
Pureza del Azufre (%p/p)	99,98	99,95	99,97	99,966	ASTM D4578 - 06
Humedad (%p/p)	1,5	1,5	1,4	1,466	Método KARL Fisher / ASTM D1364-64
Acidez (%p/p H ₂ SO ₄ / H ₂ S)	0,02	0,03	0,02	0,023	ASTM D4569 - 06
Ceniza (%p/p)	0,02	0,02	0,01	0,016	ASTM D856 - 91
Tamaño promedio (mm)	3,5	3,4	3,3	3,400	ASTM D4570 - 02

Es importante destacar que las especificaciones fisicoquímicas de diseño, del azufre fundido que ingresa a cualquier planta de ácido sulfúrico, son ampliamente conocidas y se manejan como valores estándar en la industria, por lo que la alimentación deberá cumplir con



estos requerimientos. En la tabla 4.1 se presentan las características requeridas para el azufre que se alimenta a una planta general para la producción de ácido sulfúrico.

Observando esto y al comparar con los valores obtenidos mediante la caracterización del azufre sólido en los Mejoradores (Tablas 4.2 y 4.3), se puede apreciar que en ambos casos se tienen las condiciones requeridas de pureza y tamaño, sin embargo en el Mejorador 2 los valores de humedad y acidez se encuentran por encima de los valores requeridos, lo que evita que el azufre generado en estas instalaciones se pueda seleccionar para ser usado directamente en la producción de ácido sulfúrico.

Por su parte el Mejorador 1 ofrece mejores características en la materia prima para la producción de ácido sulfúrico, adicionalmente el volumen de generación de azufre anual cubre los requerimientos de la planta de ácido (1000 TMD).

4.2. Determinación de los parámetros de diseño del sistema de fundición del azufre sólido proveniente de los mejoradores de crudo en Anzoátegui.

El sistema para fundir el azufre sólido proveniente de los mejoradores de Anzoátegui consta de una primera etapa de almacenamiento, donde se recibe la materia prima que llega por medio de camiones provenientes del muelle ó por vía terrestre; posteriormente, por medio de un sistema de transporte, se deposita el azufre en el tanque de fundición, esto se debe realizar de manera controlada con la finalidad de no afectar la velocidad de fusión. Es importante destacar que durante la alimentación se debe agregar óxido de calcio en el azufre, con la finalidad de neutralizar la acidez presente en la materia prima y así evitar la corrosión de las partes



metálicas expuestas al azufre fundido dentro del sistema, este óxido se puede adicionar de forma sólida mezclándolo manualmente con el azufre.

El tanque de fundición de azufre está equipado con una serie de intercambiadores de calor ubicados en el fondo del equipo que funcionan con vapor proveniente del área de servicios industriales del Complejo Petroquímico Morón, según las características presentadas en el Apéndice C. El tanque cuenta con una bomba sumergida en el azufre fundido que se utiliza para enviar éste desde el tanque de fundición al filtro de Azufre y posteriormente al tanque de almacenamiento de Azufre fundido. En el filtro de Azufre se tienen dos corrientes, la corriente libre de partículas sólidas que se envía al tanque de almacenamiento de Azufre fundido y la corriente que se devuelve al sistema de fundición, la cual controla el nivel del fluido caliente dentro del tanque y promueve el intercambio de calor de las partículas sólidas que ingresan al sistema, el nivel de líquido en el tanque debe ser controlado ya que de esto depende la transferencia de calor del sistema.

El flujo de vapor que alimenta a los intercambiadores de calor ubicados en el fondo del tanque de fundición, debe ser ajustado mediante un lazo de control en función de la temperatura dentro del tanque, lo que garantiza una fundición eficiente y homogénea.

Todos los equipos están diseñados para manejar 1000 toneladas métricas diarias, cantidad requerida para el funcionamiento de la planta de Ácido Sulfúrico, la cual tiene una capacidad de 2000 toneladas métricas por día. Con esto se pretenden aprovechar los excedentes de Azufre sólido de los mejoradores de crudo de Anzoátegui.

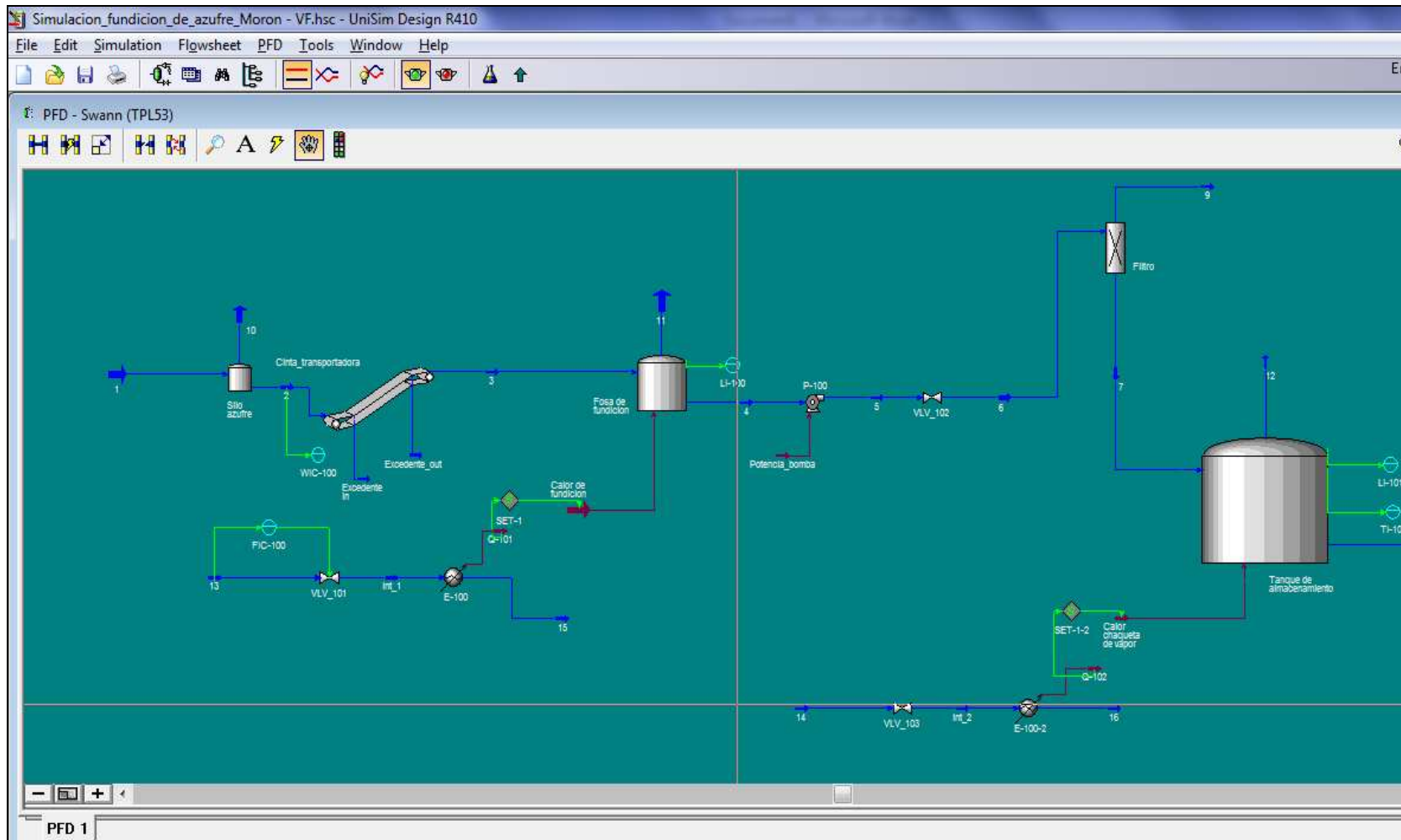


Figura 4.1. Diagrama del proceso del sistema de fundición y almacenamiento de azufre.

A continuación se presenta la lista de los equipos presentes en el sistema de fundición de Azufre y el diagrama de flujo de proceso, así como también los balances de masa y energía de todo el sistema calculado con el software (Ver Apéndice D).

Tabla 4.4. Lista de equipos en el sistema de fundición de azufre

Código del Equipo	Cantidad de Equipos	Descripción
TFS01	1	Silo de alimentación del Azufre sólido
TFS02	1	Cinta transportadora del Azufre sólido
TFS03	1	Tanque de fundición de Azufre
TFS04	1	Bomba de Azufre fundido

Tabla 4.5. Lista de componentes presentes en el sistema

Componente	Descripción
Ss	Azufre sólido
Sl	Azufre líquido
C	Carbón en forma de cenizas
Im	Impurezas

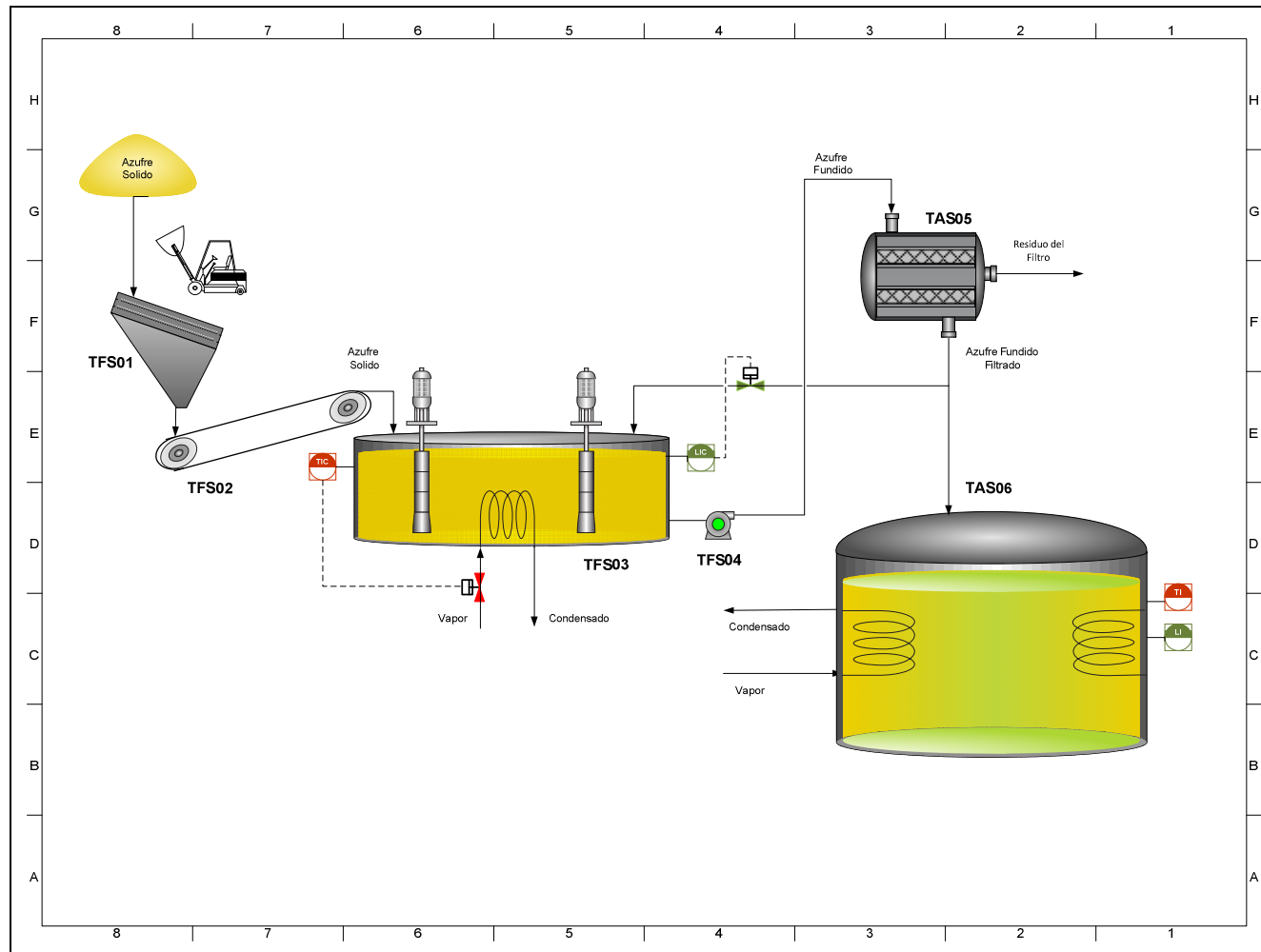


Figura 4.2. Diagrama de flujo de proceso del sistema de fundición y almacenamiento de azufre (PFD).

Tabla 4.6. Balance de masa y energía en la etapa de fundición de azufre

CORRIENTES	1	2	3	4	5
Flujo Másico (ton/h)	40,53	40,53	40,53	40,53	40,53
Descripción	Azufre IN TFS01	Azufre IN TFS02	Azufre IN TFS03	Azufre IN TFS04	Azufre IN TAS05
Temperatura (°C)	25	25	25	140	138
Presión (kPa)	101,3	101,3	101,3	101,3	2770,7
Densidad (kg/m ³)	2037,9	2037,9	2037,9	1733,7	1735,5
Entalpía (kJ/kg)	-8579,68	-8579,68	-8579,68	-72635,69	-72546,95
Flujo volumétrico de líquido (m ³ /h)	19,9	19,9	19,9	22,7	22,7
Fracción de vapor	-	0	-	0	-
Fracción de líquido	0,97	0,97	0,97	0,00	0,00
Fracción másica de Azufre sólido (Ss)	0,98	0,98	0,98	0,00	0,00
Fracción másica de Azufre líquido (Sl)	0,00	0,00	0,00	0,98	0,98
Fracción másica de Carbón (C)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Fracción másica de Impurezas (Im)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

A continuación se presenta la descripción y los resultados asociados a cada una de las etapas del sistema de fundición:

ETAPAS Y EQUIPOS PRINCIPALES

- **Almacenamiento de azufre sólido:**

Debido a que el Azufre sólido es un compuesto inflamable y puede formar mezclas combustibles con el aire rápidamente, además de que puede incendiarse generando Dióxido de Azufre, gas altamente tóxico, se debe tener especial cuidado durante su almacenamiento.

El almacenamiento a granel de Azufre se debe hacer en pilas sobre piso de hormigón, en lugares abiertos, evitando la contaminación con las sustancias incompatibles, fuentes de ignición y efectos del viento.

El almacenamiento de Azufre en contenedores cerrados se debe hacer en lugares frescos y ventilados, secos, a prueba de corrosión, lejos de la humedad, de fuentes de calor, entre otros, además se debe evitar la formación de polvo en el sitio y el contacto con sustancias incompatibles.

En el diseño de este sistema se considera que la materia prima proveniente de los mejoradores de crudo en Anzoátegui se deposita a granel en un almacén techado ubicado dentro del Complejo Petroquímico. Éste debe tener una capacidad de al menos 1000 TM, con la finalidad de soportar la cantidad de materia prima necesaria para las operaciones equivalentes a un día de la unidad de fundición y almacenamiento de Azufre y de la planta de Ácido Sulfúrico. Posteriormente el Azufre es transportado desde el almacén techado hasta el silo (TFS01) usando camiones apropiados para manipular este químico; el equipo TFS01 sirve como almacenamiento antes del ingreso a la etapa de fundición e indirectamente funciona como mecanismo de seguridad en conjunto con la cinta transportadora para evitar acercamiento del personal en el tanque de fundición (TFS03).



De acuerdo a los cálculos realizados, se determinó que la capacidad de almacenamiento apropiada para el silo es igual a 30 TM ($14,7 \text{ m}^3$), ya que esto garantiza una alimentación continua durante 45 minutos en caso de que se paralice la alimentación externa, y a su vez las dimensiones obtenidas del equipo con esta capacidad son acordes a equipos de este tipo presentes en sistemas de alimentación.

En cuanto a la geometría del equipo, se propone un silo del tipo cilíndrico con fondo cónico, con descarga por efecto de la gravedad. Éste puede ser construido en acero al carbono, material que no reacciona con el Azufre y que es ampliamente utilizado en este tipo de equipos.

En los silos la mayor parte del producto se concentra en la zona cilíndrica, es por esto que se definió como premisa disponer el 90 % del volumen en esta sección y el resto en la tolva de descarga. Por otro lado el ángulo que debe tener la sección cónica con respecto a la horizontal debe ser considerablemente mayor que el ángulo de reposo del Azufre sólido, con lo que se garantiza que el Azufre tenga fluidez dentro del contenedor (PDVSA, 1997).

De acuerdo a estas consideraciones se determinó que la altura total del silo es igual 3,6 m y el diámetro es igual a 2,5 m, con un ángulo de 36° respecto a la horizontal. La mayor parte de los cálculos se hicieron utilizando el software (Ver Apéndice E), el resto se calculó de forma manual una vez definida la geometría del tanque.

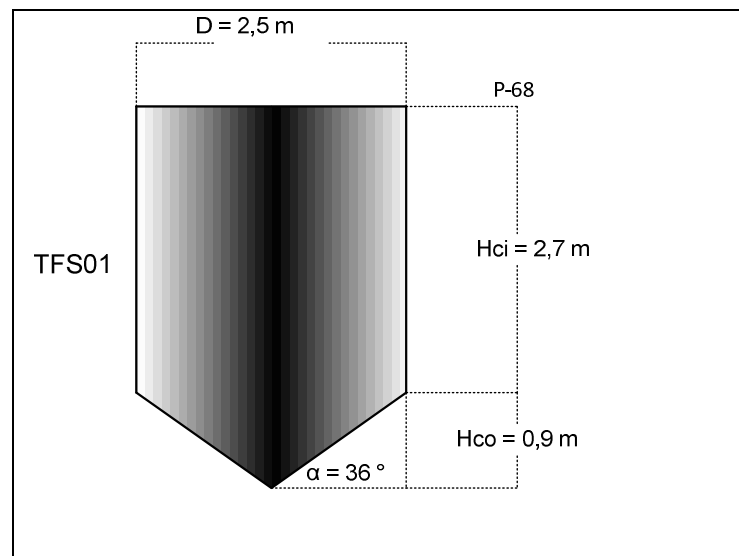


Figura 4.3. Parámetros de diseño del silo de almacenamiento (TFS01).

- **Transporte de azufre sólido:**

Esta etapa permite el transporte del Azufre sólido desde el silo de almacenamiento hasta el tanque de fundición de Azufre mediante una cinta transportadora (TSF02), de acuerdo a las características físicas del Azufre sólido que influyen en su desplazamiento.

La disposición de la cinta transportadora propuesta es del tipo sencilla, sin la polea de desaire “*Snub Pulley*” y operando en un solo sentido, esta configuración se adapta a la función que se pretende alcanzar con este diseño.

Debido al tamaño de las partículas de Azufre, el ancho mínimo de la cinta transportadora debe ser igual a 0,4 m (Ver Apéndice F), esto con la finalidad de evitar la pérdida de materia prima durante la operación y cumplir la función para la cual se diseñó el equipo, a su vez la longitud total de la cinta es igual a 8 m, de acuerdo a la disposición de los equipos en el área de la planta de fundición. Con el ancho mínimo de la cinta se determina la velocidad máxima a la cual puede funcionar el equipo, esta es igual a 180 m/min (Ver Apéndice G) y adicionalmente para cintas con



anchos por debajo de 0,6 m, el número mínimo de capas en el equipo, para el correcto soporte de la carga, es igual a 2.

Por otro lado, el ángulo de inclinación de la cinta transportadora en su instalación, debido al tipo de material, debe ser máximo de 23 grados (Ver Apéndice H); ahora bien con la longitud y el ángulo máximo de inclinación se determinó la altura máxima de elevación de la cinta, siendo ésta igual a 3,39 m. Con estos valores se garantiza que el material no se deslice sobre el equipo y se evita la acumulación en la base del mismo.

Una de las características fundamentales para el diseño de este tipo de equipos es la determinación de la potencia requerida para el movimiento del material y del equipo en sí; esta potencia no es más que la suma de las potencias del eje horizontal sin carga, del mismo eje con carga, del eje vertical bajo carga y la potencia motriz del apilador, en este caso es igual a 2,44 kW, este valor es el que debe entregar el motor para poder darle movimiento a todo el equipo. La potencia del eje horizontal sin carga representa el valor que requiere la cinta transportadora para moverse según sus características de construcción, para esto es necesario considerar características como la fricción de los rodamientos, la longitud ajustada horizontal, peso de las partes móviles, entre otras; lo cual se hizo bajo el procedimiento mostrado en el Manual de Diseño de una Cinta Transportadora (Bridgestone Corporation, 2000). Los valores seleccionados para la determinación de la potencia requerida por la cinta se muestran en los apéndices desde el I al M.

Otro parámetro de diseño es la tensión máxima de la cinta transportadora bajo carga, esto no es más que la tensión que debe soportar el material de la cinta bajo las labores de operación, su cálculo sirve como base para la selección de dicho material; la tensión máxima se determina a partir de la tensión efectiva de la cinta, la tensión donde se



ejecuta el mayor esfuerzo, la tensión en la parte de menor esfuerzo, la que se produce debido a la inclinación y la tensión mínima bajo carga. La tensión máxima que debe soportar la cinta transportadora del Azufre sólido en este sistema es igual a 180,46 kg, la cual se calcula a partir del coeficiente de fricción y en ángulo de contacto entre las poleas y la cinta transportadora (Ver Apéndices N y O). Con la tensión máxima sobre la cinta transportadora, el factor de seguridad de la cinta (Ver Apéndice P) y el ancho efectivo de la misma se selecciona el material óptimo para su construcción, en este caso el material sugerido es Nylon bajo la codificación NF 800/3-5 (Ver Apéndice Q).

Una vez definido el material estándar con el que se debe trabajar, se determina cual es la tensión de trabajo del equipo, en este caso para el tipo de material la tensión de trabajo es igual a 70 kN/m (ver apéndice R).

Dentro de las condiciones de operación de la cinta transportadora también se encuentra el grosor de las capas presentes en la misma y su peso aproximado total; de acuerdo al tamaño, tipo de material, y tomando en cuenta correas de goma, el espesor recomendado de la capa superior es igual a 2 mm y la correa inferior se debe construir con un espesor igual al 70 % de la superior (Ver Apéndice S). El peso aproximado de la cinta según todos los valores señalados anteriormente es igual a 3,36 kg/m.

En cuanto a los datos de la unidad, se sugiere que la cinta transportadora cuenta con dos poleas, la polea principal ó de accionamiento y la polea que permite el retorno de la cinta transportadora; no se prevé instalar un sistema para la adición de materia prima móvil sobre la cinta, la carga se incorpora en la base del equipo. Además se propone la utilización de 3 rodillos a lo largo de toda la cinta que impulsen el movimiento de la misma formando un canal donde se deposita el material con un ángulo de 15 grados (Ver Apéndice T). Se recomienda

utilizar empalmes vulcanizados sobre la cinta y sujetadores con la finalidad de aumentar la vida útil del equipo.

Por su parte, las poleas son caracterizadas según su diámetro, para el caso de la polea de accionamiento éste valor es igual a 0,525 m y la polea de retorno tiene un diámetro igual a 0,42 m. (Ver Apéndices U y V).

Con la determinación de estos valores, la cinta transportadora tiene la capacidad de movilizar 69,32 Ton/h de Azufre, lo cual resulta adecuado para la cantidad que se desea alimentar la cual es igual a 42 Ton/h, con esto se requiere solo un equipo operando durante el ciclo de alimentación del tanque de fundición de Azufre.

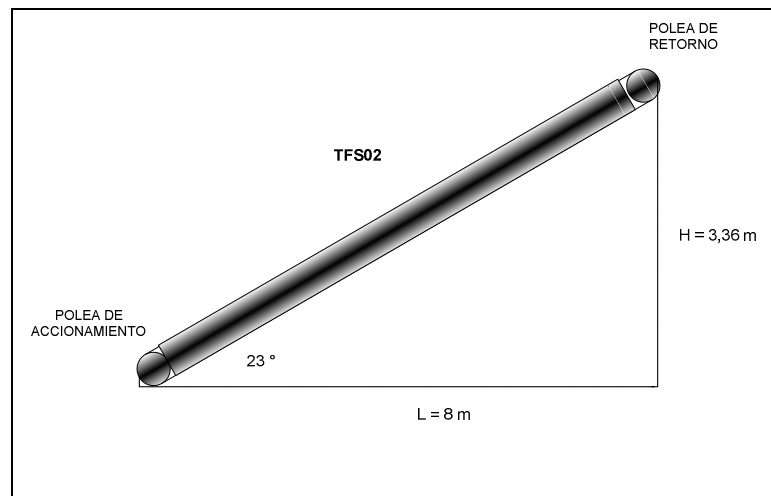


Figura 4.4. Parámetros de diseño de la cinta transportadora (TFS02).

Con el software se determinaron ciertas características de operación del equipo necesarias para la convergencia de todo el modelo, sin embargo los resultados fueron mejorados de acuerdo al procedimiento descrito anteriormente, en el Apéndice W se observan la información obtenida en el simulador.

- **Fundición de azufre:**

En la etapa de fundición es donde se promueve el cambio de fase del Azufre sólido, mediante el suministro de calor generado por una serie de intercambiadores ubicados en la parte inferior del tanque de fundición (TFS03).

El ingreso de Azufre sólido al tanque se hace de forma controlada con la finalidad de no afectar el intercambio de calor interno; en el equipo siempre se debe mantener mayor cantidad de Azufre fundido, ya que este funciona como agente de calentamiento promoviendo la fusión de las partículas que entran al sistema. En la simulación de todo el sistema se incluyó un controlador del flujo de Azufre en la entrada del tanque que funciona según las características presentadas en la figura 4.9 de este capítulo.

Por su parte el volumen de Azufre fundido dentro del tanque se controla mediante la manipulación de la corriente de reciclo que sale de la etapa de filtración, esto se hace de acuerdo a la medición manual del nivel dentro del tanque mediante un indicador. Debido a que en la simulación, la determinación de los parámetros de diseño se hace en estado estacionario esta corriente de reciclo no tiene información, de igual forma se conoce que para este tipo de sistemas manejar un reciclo representa un incremento en la eficiencia del proceso.

Adicionalmente, se debe controlar la temperatura dentro del equipo lo que se logra mediante la manipulación en la alimentación del vapor proveniente del área de servicios industriales del Complejo Petroquímico; controlando esta variable se mantiene la tasa de fusión dentro del sistema y el equilibrio entre la cantidad de Azufre sólido y fundido. Se puede observar el detalle en la figura 4.9 de este capítulo.



La capacidad del tanque de fundición es igual a 116,32 TM ($57,02 \text{ m}^3$), lo que permite completar el proceso de fundición del volumen que ingresa al sistema con un tiempo de residencia estimado igual a 2,7 h, valor que se tomó como referencia de otros procesos similares y que garantiza el cambio de fase de todo el volumen de Azufre.

El flujo de calor que se requiere para cumplir con el cambio de fase del Azufre es igual a $8,205 \times 10^7 \text{ kJ/h}$, este intercambio se logra gracias al flujo de vapor que ingresa mediante los intercambiadores ubicados estratégicamente en el fondo del tanque, esto a su vez incrementa la temperatura del Azufre sólido desde $25 \text{ }^\circ\text{C}$ (temperatura ambiente) hasta $140 \text{ }^\circ\text{C}$, la cual es la temperatura de fundición de este químico.

En la etapa de fundición y en las próximas etapas, las temperaturas del Azufre fundido deben mantenerse por debajo de $145 \text{ }^\circ\text{C}$, ya que valores por encima de $150 \text{ }^\circ\text{C}$ aumentan considerablemente la viscosidad del Azufre (Ver Apéndice X). Todas las líneas deben estar aisladas y enchaquetadas, lo que se logra en la mayoría de los casos circulando el Azufre por tuberías de $1 \frac{1}{2}$ " dentro de otro tubo de $2 \frac{1}{2}$ " por el cual circula el vapor que mantiene el Azufre en fase líquida. Las tuberías están conformadas por una serie de tubos de poca longitud para su fácil reemplazo en caso de obstrucciones, además posee conexiones para la entrada de vapor y salida de condensado.

Se puede utilizar un tanque cilíndrico para la operación de fundición, éste debe ser construido en acero al carbono con aislamiento externo para evitar la pérdida de calor, mejorar la eficiencia del proceso de fundición y controlar la viscosidad en todo el sistema. Por lo general este tipo de tanques se encuentran cerrados y la presión del sistema es presión atmosférica. El aislante está construido en lana mineral, lo que impide la pérdida de calor al ambiente.

Una vez determinado el volumen en el tanque con el software (Ver Apéndice Y) y de acuerdo a las dimensiones de los equipos definidos anteriormente se calculó la altura y el diámetro del mismo, siendo estas 4,8 m y 3,9 m respectivamente.

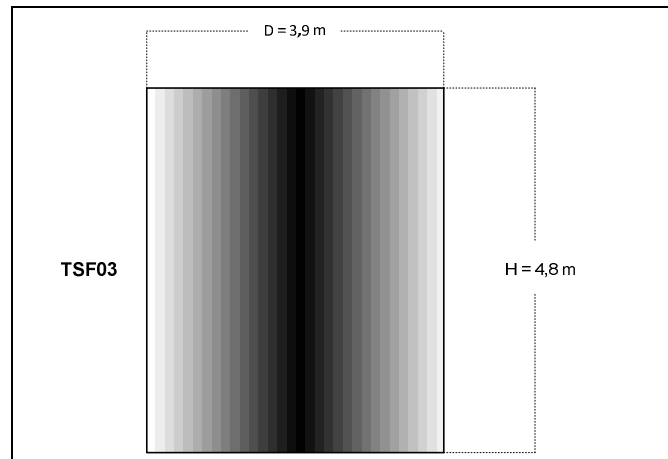


Figura 4.5. Parámetros de diseño del tanque de fundición (TSF03).

- **Bombeo de azufre:**

En la parte interna del tanque se encuentra la bomba de Azufre fundido (TSF04) y se utiliza para bombear el Azufre fundido hasta el tanque de almacenamiento pasando previamente por el filtro de Azufre.

La presión de succión de la bomba es igual a 101,3 kPa y la presión de descarga es igual a 2.770,7 kPa, esta diferencia de presión mantiene la temperatura por debajo de lo indicado anteriormente en todo el sistema; la temperatura a la entrada de la bomba es igual a 140 °C y a la salida es igual a 136,7 °C.

La bomba es del tipo centrífuga vertical sumergible, ya que estas bombas son ampliamente usadas en procesos similares, aportando mejores condiciones de sello. El material de construcción sugerido es

acero al carbono con el impulsor en hierro fundido, materiales resistentes a la corrosión y a las altas temperaturas manejadas en el sistema.

Las bombas centrífugas además permiten el manejo de líquidos que contienen cantidades considerables de sólidos en suspensión.

Para la determinación de los parámetros de diseño de la bomba se establecieron una serie de premisas (Apéndice Z), con las cuales se determinó la potencia requerida por la bomba para operar correctamente, este valor es igual a $1,135 \times 10^5$ kJ/h, lo que asegura la ejecución de las operaciones de bombeo al tanque de almacenamiento (Ver apéndice Z). El cabezal de la bomba es igual a 157 m, la eficiencia es 55 % y el aumento de presión es de 2.669 kPa.

A continuación se presentan las curvas de cabezal de la bomba determinadas durante la simulación, donde se indica el punto de operación de la bomba TSF04 en este sistema.

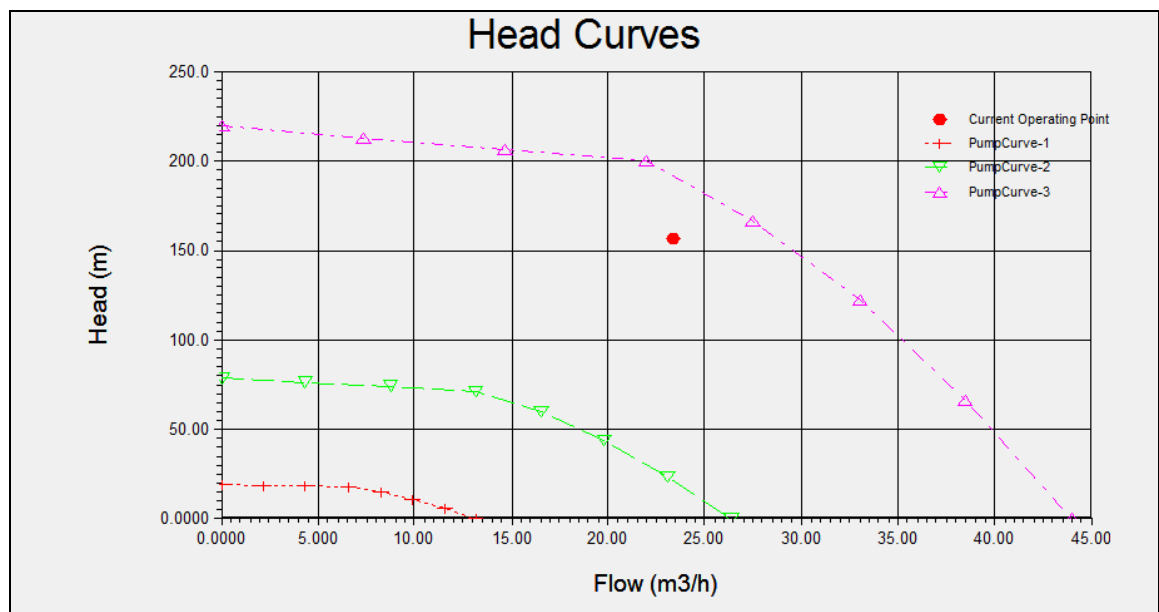


Figura 4.6. Curvas de cabezal de la bomba de azufre fundido.



4.3. Diseño de un sistema de almacenamiento capaz de recolectar el azufre fundido proveniente de la unidad de fundición.

El sistema de almacenamiento tiene como finalidad acumular el Azufre fundido proveniente del tanque de fundición y alimentar éste a la planta de Ácido Sulfúrico; el equipo principal es el tanque de almacenamiento de Azufre fundido (TSA06) donde se debe controlar la viscosidad del Azufre manipulando la temperatura mediante el intercambio de calor.

El tanque de almacenamiento está provisto de unos intercambiadores de calor ubicados en el interior del mismo, y funcionan con el vapor proveniente del área de servicios industriales del Complejo Petroquímico.

En el diseño del sistema de almacenamiento del Azufre fundido, se incluye también el diseño del filtro (TAS05), el cual permite la alimentación de una corriente de Azufre fundido libre de partículas sólidas; la filtración es imprescindible ya que el ingreso de material sólido a la planta de Ácido Sulfúrico afectaría considerablemente el funcionamiento de las unidades de combustión de Azufre.

El sistema está diseñado para que desde el filtro se obtengan dos corrientes, una que va al tanque de almacenamiento y otra que se retorna al tanque de fundición de Azufre, permitiendo mantener el nivel de fluido caliente y promover el intercambio de calor de las partículas sólidas que están ingresando constantemente.

A continuación se presenta la lista de equipos que constituyen el sistema de almacenamiento de Azufre fundido, el balance de masa y energía de las corrientes principales en esta sección y la descripción de las etapas y equipos principales presentes.

Tabla 4.7. Lista de equipos en el sistema de almacenamiento de azufre

Código del Equipo	Cantidad de Equipos	Descripción
TAS05	1	Filtro de Azufre
TAS06	1	Tanque al almacenamiento

Tabla 4.8. Balance de masa y energía en la etapa de almacenamiento de azufre

CORRIENTES	6	7	8	9
Flujo Másico (ton/h)	40,53	39,91	39,91	0,62
Descripción	Azufre IN TAS05	Azufre IN TAS06	Azufre OUT TAS06	Azufre OUT TAS05
Temperatura (°C)	138	120	141	140
Presión (kPa)	2681,3	1200,0	1200,0	101,3
Densidad (kg/m ³)	1735,4	1768,9	1755,2	0,5
Entalpía (kJ/Kg)	-72546,95	-68094,62	-67092,42	-236229,05
Flujo volumétrico (m ³ /h)	22,7	22,1	22,1	0,6
Fracción de vapor	-	-	0	1
Fracción de líquido	0,00	-	-	0,00
Fracción másica de Azufre sólido (Ss)	0,00	0,00	0,00	0,00
Fracción másica de Azufre líquido (Sl)	0,98	1,00	1,00	0,00
Fracción másica Carbón (C)	0,00	0,00	0,00	0,00
Fracción másica Impurezas (Im)	0,00	0,00	0,00	0,01

ETAPAS Y EQUIPOS PRINCIPALES

- **Filtración:**

En esta etapa se remueven las partículas sólidas de menor tamaño que están suspendidas en el fluido así como también las impurezas presentes en el Azufre. Una parte de la corriente filtrada de Azufre fundido (>99,99 % de pureza) se recicla al tanque de fundición, según el control



de nivel, la otra parte se envía al tanque de almacenamiento. El objetivo principal de la filtración es evitar obstrucciones en el sistema y garantizar la calidad de la materia prima que se requiere a la entrada de los hornos de combustión de la planta de Ácido Sulfúrico.

Generalmente en el proceso de filtración de un fluido es necesaria la recuperación del componente sólido suspendido debido a su valor comercial, es por esto que las caídas de presiones asociadas a este tipo de proceso son elevadas, y es lo que impulsa la implementación de una corriente de reciclo. En este caso, la corriente que se expulsa del equipo tiene alto contenido de impurezas y su valor comercial es mínimo, es por esto que se elimina del sistema.

En la selección de un filtro es necesario definir el trabajo, conocer el flujo volumétrico, fijar la cantidad de impurezas en el sistema que se desea eliminar y conocer la compatibilidad del fluido que se va a filtrar en contraposición al material del equipo y del medio filtrante (Sutherland, 2008). Una vez definidas las premisas se determina la configuración del filtro y el lecho a utilizar para ejecutar la operación.

De acuerdo a las características asociadas a la filtración de Azufre, a la cantidad de éste que se desea remover y a las condiciones de operación del sistema, se recomienda un filtro de hoja horizontal (ver configuración típica en el Apéndice AA). Estos filtros por lo general incorporan una matriz de elementos planos filtrantes dentro de un tanque presurizado de sección transversal circular; el Azufre fundido unido con el material filtrante fluye por la sección transversal del equipo y atravesando las placas filtrantes, para luego depositarse en el tanque de almacenamiento. La corriente con impurezas se retira del sistema en conjunto con el desperdicio del filtro *“slurry”*.

El medio filtrante que se sugiere es la tierra de diatomeas “*Diatomaceous Earth*”, la cual ofrece una acción filtrante bastante profunda y es muy efectiva para la filtración de partículas finas, ofreciendo baja resistencia al fluido y disminuyendo la caída de presión en el sistema (Sutherland, 2008).

El medio filtrante es agregado directamente al Azufre fundido antes del ciclo de filtración y se recupera en etapas de refinación posteriores. El material es completamente compatible con el Azufre fundido y se utiliza como un lecho de sólidos inertes relativamente grueso que se forma antes de la corriente que ingresa al filtro y se utiliza como el medio filtrante principal, la filtración se hace por arrastre; este procedimiento se emplea generalmente cuando los sólidos separados no se deben tratar posteriormente.

Los filtros que utilizan la tierra de diatomeas generalmente se utilizan como filtros secundarios, sin embargo se pueden obtener hojas filtrantes con este material con el uso de un aglutinante para mejorar la capacidad de filtración (Ver Apéndice BB).

- **Almacenamiento de azufre fundido:**

El tanque de almacenamiento mantiene reservado el Azufre fundido con la calidad necesaria para la planta de Ácido Sulfúrico, permitiendo que ésta tenga independencia en el suministro de materia prima. El diseño del tanque está orientado a garantizar la fluidez del Azufre mediante el control de su viscosidad, lo que se logra con aislamiento y el uso de intercambiadores de calor dentro del mismo.

La capacidad del tanque de almacenamiento (TAS06) es igual a 5.426 TM (2.660 m³), lo que permite almacenar el equivalente al requerimiento

de 5 días de operación de la planta de Ácido Sulfúrico, evitando impactos sobre la continuidad operacional debido a falta de materia prima.

En este equipo es fundamental un intercambio de calor óptimo para poder mantener el Azufre en fase fundida evitando pérdidas al ambiente, con temperaturas entre 135 °C y 140 °C y con un rango de viscosidad aceptable. El flujo de calor que se requiere para cumplir con dichos requerimientos es igual a $1,247 \times 10^6$, el cual se obtiene gracias a un flujo de vapor igual a 0,48 TM/h a una temperatura de 300 °C.

Se puede utilizar un tanque cilíndrico para el almacenamiento de Azufre, éste debe ser construido en acero inoxidable con aislamiento para evitar la pérdida de calor. Por lo general este tipo de tanques están cerrados y la presión del sistema es presión atmosférica. El material sugerido para el aislante externo en lana mineral.

Una vez determinado el volumen en el tanque con el software (Ver Apéndice CC) y de acuerdo a las dimensiones de los equipos definidos anteriormente, se calculó el diámetro y la altura del mismo, siendo estas 15,0 m y 15,1 m respectivamente.

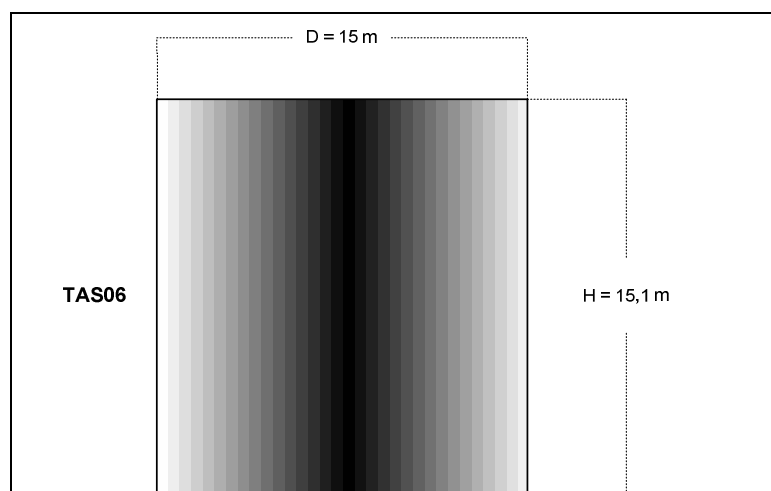


Figura 4.7. Parámetros de diseño del tanque de almacenamiento TAF06).

4.4. Propuesta de la instrumentación básica del sistema de fundición y almacenamiento del azufre fundido que será alimentado a la planta de ácido sulfúrico ubicada en Morón, estado Carabobo.

Partiendo del esquema planteado anteriormente y el análisis de los resultados se incorporó en el sistema una instrumentación para el control de tres variables fundamentales: el flujo másico del Azufre sólido que ingresa al tanque de fundición, la temperatura en el interior del tanque de fundición y el nivel de líquido dentro del mismo. Así como también se elaboró un diagrama de instrumentación y tuberías a partir del diagrama de proceso (Ver figura 4.8).

El control del caudal de sólido que ingresa al tanque de fundición se realiza según la medición del peso, lo cual se hace con el uso de una balanza ubicada en la cinta transportadora; posterior a la medición, se envía una señal al controlador de velocidad (SIC) que ejerce su función sobre el motor impulsando la cinta para acelerar o desacelerar el equipo.

La temperatura dentro del tanque se controla manipulando el flujo de vapor que ingresa a los intercambiadores ubicados en el fondo del mismo; para el control se utiliza un controlador de flujo (FIC), el cual envía una señal neumática sobre la válvula ubicada en la línea de vapor, el controlador de flujo recibe la información de una serie de dispositivos que miden y transmiten la temperatura del tanque. El objetivo de este control es promover la fundición de las partículas sólidas que ingresan al sistema y con esto garantizar la eficiencia del proceso de intercambio de calor.

El control del nivel de líquido dentro del tanque de fundición se ejecuta mediante la manipulación de la corriente de Azufre fundido que retorna al mismo desde el filtro, con esto se garantiza suficiente volumen de Azufre fundido presente en el equipo de fundición operando como medio caliente



para promover la fundición de las partículas de Azufre sólido que ingresan al sistema. En este caso el control se hace de forma manual, manipulando la válvula ubicada en la línea (válvula de control de nivel), de acuerdo a la información visualizada en el indicador de nivel instalado en el tanque.

Adicionalmente en el tanque de almacenamiento de Azufre, se colocaron dos indicadores, uno de nivel y otro de temperatura, los cuales permitirían, de acuerdo a la medición, tomar acciones sobre la corriente de Azufre que ingresa a dicho equipo y el flujo de vapor.

Las tuberías que se observan en el DTI están conformadas principalmente por: líneas para el movimiento de Azufre fundido, tuberías de vapor, tuberías de condensado y una tubería para la descarga del residuo del filtro. Para el movimiento de Azufre fundido se utiliza una tubería encamisada de Acero al Carbono con un diámetro en el núcleo de 1 y ½” y en la camisa de 2 y ½” (ver apéndice FF), adicionalmente se debe instalar un aislante de lana mineral, el cual permite la conservación total del calor (Ver apéndices DD y EE). Las válvulas que se instalan de acuerdo a estos diámetros son de ¾”, característica que se le asignó a la válvula para el control de nivel. Las tuberías de vapor son de Acero al Carbono con un diámetro de 4” resistentes a las altas presiones y temperaturas que caracterizan al vapor sobrecalentado que ingresa al sistema, la válvula ubicada en la línea para manipular el flujo de vapor que ingresa a los intercambiadores ubicados en el tanque de fundición, tiene un diámetro de 4”. Estas líneas deben estar aisladas para la conservación total del calor y la lana mineral es el material apropiado para este fin. Las características de las tuberías para vapor sobrecalentado se muestran en el apéndice GG. Las tuberías de condensado y del residuo del filtro son en Acero al Carbono de 3” y 2” respectivamente; en estas líneas no se requiere una conservación del calor por lo que no existe ningún tipo de aislamiento.

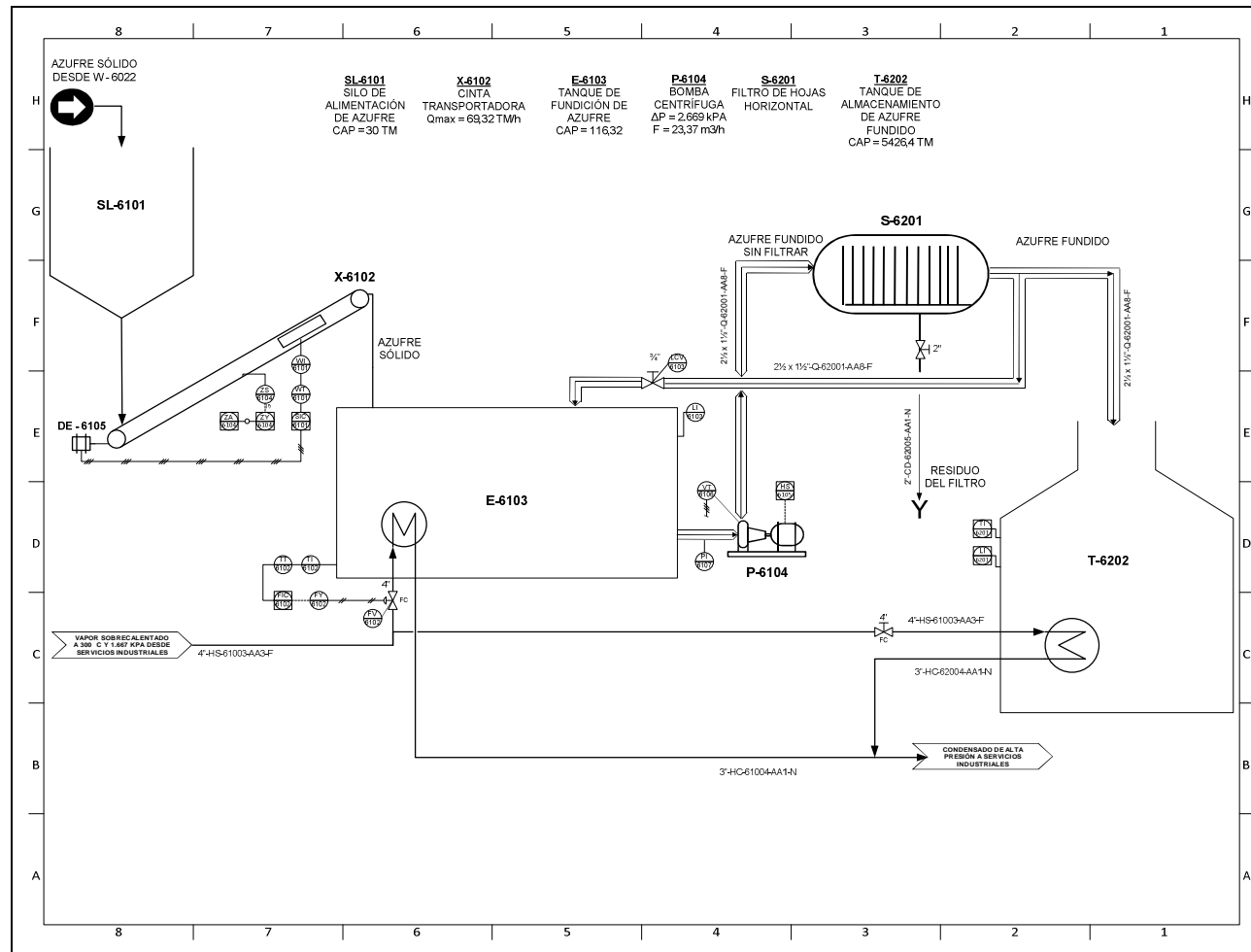


Figura 4.8. Diagrama de procesos e instrumentación del sistema de fundición y almacenamiento de Azufre (P&ID).



4.5. Establecimiento de las hojas de especificaciones de los equipos principales del sistema de fundición y almacenamiento de azufre líquido.

A continuación se presentan las hojas de especificaciones o “*data sheet*” de los equipos principales en el sistema de fundición y almacenamiento de Azufre.

Tabla 4.9. Hoja de especificación del silo de alimentación de Azufre sólido

PROYECTO Ácido Sulfúrico Morón	PLANTA Fundición de Azufre	EQUIPO Silo de Alimentación	CÓDIGO TFS01
DESCRIPCIÓN Permite la alimentación del Azufre sólido al sistema			
GENERAL			
Tipo		Cilíndrico con fondo cónico	
Cantidad		1	
Aislamiento		No	
Capacidad (TM)		30	
CONDICIONES DE OPERACIÓN			
Fluido		Azufre sólido	
Pureza del Azufre (%p/p)		99,91	
Humedad (%p/p)		0,0960	
Acidez (%p/p H ₂ SO ₄ / H ₂ S)		0,0016	
Ceniza (%p/p)		0,0046	
Tamaño promedio (mm)		3,23	
Flujo másico (TM/h)		40,5	
Temperatura (°C)		25	
ESPECIFICACIONES DE DISEÑO			
Diámetro del equipo (m)		2,5	
Altura de la sección cilíndrica (m)		2,7	
Altura de la sección cónica (m)		0,9	

Tabla 4.9. Hoja de especificación del silo de alimentación de Azufre sólido
(Cont.)

PROYECTO Ácido Sulfúrico Morón	PLANTA Fundición de Azufre	EQUIPO Silo de Alimentación	CÓDIGO TFS01
ESPECIFICACIONES DE DISEÑO			
Altura total (m)		3,6	
Angulo del cono con respecto a la horizontal (°)		36	
MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN			
SECCIÓN		MATERIAL SUGERIDO	
Cilindro		Acero al carbono	
Tolva		Acero al carbono	

Tabla 4.10. Hoja de especificación de la cinta transportadora de Azufre sólido

PROYECTO Ácido Sulfúrico Morón	PLANTA Fundición de Azufre	EQUIPO Cinta Transportadora	CÓDIGO TFS02
DESCRIPCIÓN Transportar el Azufre solido desde el silo de alimentación hasta el tanque de fundición			
CONDICIONES DE OPERACIÓN			
Tipo		De un solo sentido / Estándar	
Cantidad		1	
Ancho de la cinta (mm)		400	
Longitud horizontal (m)		8	
Ángulo máximo de inclinación (°)		23	
Altura de alzamiento (m)		3,39	
Velocidad máxima de la cinta (m/min)		180	
Potencia requerida (kW)		2,44	
Tensión máxima bajo carga (kg)		180,46	
Tensión de trabajo de la correa (kN/m)		70	
Material sugerido de la cinta		NF800/3-5 – Nylon	
Número mínimo de capas de goma		2	



Tabla 4.10. Hoja de especificación de la cinta transportadora de Azufre sólido (cont.)

PROYECTO Ácido Sulfúrico Morón	PLANTA Fundición de Azufre	EQUIPO Cinta Transportadora	CÓDIGO TFS02
CONDICIONES DE OPERACIÓN			
Grosor de la cubierta de goma superior (mm)		2	
Grosor de la cubierta de goma inferior (mm)		1,4	
Peso aproximado de la cinta (kg/m)		3,35	
DATOS DE LA UNIDAD			
Ubicación		Complejo Petroquímico Morón	
Número de poleas		2	
Cantidad de rodillos		3	
Ángulo de los rodillos (°)		15	
POLEAS			
Diámetro de la polea de accionamiento (mm)		525	
Diámetro de la polea de retorno (mm)		420	
MÉTODO DE UNIÓN			
Empalme vulcanizado		Si	
Sujetadores		Si	
DATOS DEL MATERIAL			
Tipo		Azufre sólido	
Gravedad específica (m ³ /Ton)		1,12	
Carga máxima sobre el transportador (Ton/h)		69,32	
Tamaño máximo del material (mm)		5	
Temperatura promedio (°C)		27,0	
Condiciones aceitosas		No	
CONDICIONES DE CARGA			
Puntos de carga		1	
Ubicación		Al comienzo de la correa	
Altura de carga vertical aproximada sobre la cinta (m)		1	
Rodillos de impacto		No	



Tabla 4.11. Hoja de especificación del tanque de fundición de Azufre

PROYECTO	PLANTA	EQUIPO	CÓDIGO
Ácido Sulfúrico Morón	Fundición de Azufre	Tanque de Fundición	TFS03
DESCRIPCIÓN			
Es el tanque donde se realiza la fundición del Azufre sólido			
GENERAL			
Tipo	Tanque cilíndrico		
Cantidad	1		
Aislamiento	Si		
Capacidad (TM)	116,32		
CONDICIONES DE OPERACIÓN			
Fluido	Azufre fundido		
Pureza del Azufre (%p/p)	99,91		
Humedad (%p/p)	0,0960		
Acidez (%p/p H ₂ SO ₄ / H ₂ S)	0,0016		
Ceniza (%p/p)	0,0046		
Flujo másico (TM/h)	40,5		
Tiempo de residencia (h)	2,7		
Flujo de calor requerido (kJ/h)	8,205x10 ⁷		
Densidad del fluido (TM/m ³)	2,04		
Viscosidad promedio del fluido (cP)	9,67		
Temperatura promedio del sistema (°C)	140		
Presión promedio del sistema (kPa)	101,3		
Temperatura del Vapor (°C)	300		
Presión del Vapor (kPa)	1.667,1		
ESPECIFICACIONES DE DISEÑO			
Diámetro (m)	3,9		
Altura (m)	4,8		
MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN			
Acero al carbono Aislante: Lana mineral			



Tabla 4.12. Hoja de especificación de la bomba de Azufre fundido

PROYECTO	PLANTA	EQUIPO	CÓDIGO
Ácido Sulfúrico Morón	Fundición de Azufre	Bomba de Azufre fundido	TFS04
DESCRIPCIÓN			
Enviar el Azufre fundido desde el tanque hasta el tanque de almacenamiento			
GENERAL			
Tipo	Centrífuga sumergida de diseño vertical		
Cantidad	1		
Aislamiento	No		
CONDICIONES DE OPERACIÓN			
Fluido	Azufre fundido		
Viscosidad promedio del fluido (cP)	9,67		
Flujo másico (TM/h)	40,5		
Temperatura de succión (°C)	140		
Presión de succión (kPa)	101,3		
Temperatura de descarga (°C)	136,7		
Presión de descarga (kPa)	2.770,7		
ESPECIFICACIONES DE DISEÑO			
Altura de suministro (m)	157		
Potencia (kJ/h)	1,135x10 ⁵		
Eficiencia de la bomba (%)	55		
MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN			
Cuerpo: Acero al carbono Impulsor: Hierro fundido			



Tabla 4.13. Hoja de especificación del filtro de Azufre fundido

PROYECTO Ácido Sulfúrico Morón	PLANTA Almacenamiento de Azufre	EQUIPO Filtro de Azufre	CÓDIGO TAS05
DESCRIPCIÓN Filtrar partículas sólidas de Azufre presentes en la fase fundida			
GENERAL			
Tipo		Filtro de hoja horizontal	
Cantidad		1	
Aislamiento		No	
CONDICIONES DE OPERACIÓN			
Fluido		Azufre fundido	
Flujo (TM/h)		41,7	
Viscosidad promedio del fluido (cP)		9,67	
Temperatura promedio (°C)		133	
Presión a la entrada (kPa)		2.681,3	
Presión en la descarga (kg/cm ²)		1.200	
%p/p de impurezas que se retira (%)		1	
ESPECIFICACIONES DE DISEÑO			
Área transversal (m ²)		4,9	
Material filtrante		Tierra de diatomeas	
MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN			
Acero al carbono			



Tabla 4.14. Hoja de especificación del tanque de almacenamiento de Azufre fundido

PROYECTO	PLANTA	EQUIPO	CÓDIGO
Ácido Sulfúrico Morón	Almacenamiento de Azufre	Tanque de Almacenamiento	TAS06
DESCRIPCIÓN			
Es el tanque donde se almacena el Azufre fundido proveniente del tanque de fundición			
GENERAL			
Tipo	Tanque cilíndrico		
Cantidad	1		
Aislamiento	Si		
Capacidad (TM)	5.426,4		
CONDICIONES DE OPERACIÓN			
Fluido	Azufre fundido		
Pureza del Azufre (%p/p)	99,99		
Flujo másico (TM/h)	39,9		
Flujo de calor requerido (kJ/h)	1,247x10 ⁶		
Densidad del fluido (kg/m ³)	1,77		
Viscosidad promedio del fluido (cP)	9,67		
Temperatura promedio del sistema (°C)	130		
Presión promedio del sistema (kPa)	1.200		
Temperatura del Vapor (°C)	300		
Presión del Vapor (kg/cm ²)	1.667,1		
ESPECIFICACIONES DE DISEÑO			
Diámetro (m)	15		
Altura (m)	15,1		
MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN			
Acero al carbono Aislante: Lana Mineral			



4.6. Estimación de los costos de la propuesta para determinar la factibilidad de su implementación.

4.6.1 Estimación de costos

A continuación se presentan los costos totales asociados a la implementación de un sistema de fundición y almacenamiento de Azufre.

Tabla 4.15. Costos totales de la propuesta de implementación de un sistema de fundición y almacenamiento de Azufre

Descripción	Factor de ajuste	Costos por labor (USD)	Costos por material (USD)	Costo total (USD)
Equipos				
Silo de Almacenamiento		7.798,86	23.396,57	31.195,43
Cinta transportadora		192.490,37	577.471,11	769.961,48
Tanque de fundición		18.158,02	54.474,06	72.632,08
Bomba de Azufre		20.136,91	60.410,72	80.547,63
Filtro de Azufre		13.517,59	40.552,78	54.070,38
Tanque de almacenamiento		149.586,72	448.760,15	598.346,87
COSTOS DIRECTOS		401.688,47 (DFL)	1.205.065,40 (DFM)	1.606.753,87 (DFC)
COSTOS INDIRECTOS	115 % sobre DFL			461.941,74
COSTOS TOTALES EN CAMPO (Directos + Indirectos)				2.068.695,60
COSTOS ADMINISTRATIVOS	30% sobre DFC			482.026,16
COSTOS TOTALES DE CAMPO Y ADMINISTRATIVOS				2.550.721,76⁽¹⁾



Tabla 4.15. Costos totales de la propuesta de implementación de un sistema de fundición y almacenamiento de Azufre (Cont.)

Descripción	Factor de ajuste	Costos por labor (USD)	Costos por material (USD)	Costo total (USD)
OTROS COSTOS DEL PROYECTO				
Arranque	3% sobre DFC			48.202,62 ⁽²⁾
Contingencia	15% sobre la suma de (1) y (2)			389.838,66
TOTAL OTROS COSTOS DEL PROYECTO				438.041,27
COSTO TOTAL DEL PROYECTO				2.988.763,04
INVERSIÓN TOTAL (1,5 de localización)				4.483.144,56

4.6.2. Premisas generales y financieras de la evaluación económica

Premisas Generales

- La capacidad de la planta es igual a 330.000 mil toneladas métricas anuales.
- El producto final del proceso es Azufre fundido de valor comercial.
- Las materias primas son: Azufre sólido y otros aditivos.
- El año de arranque estimado de la planta es en el 2016, según el arranque de la planta de Ácido Sulfúrico.
- La planta será ubicada en un espacio adyacente a la planta de Ácido, esto es en el municipio Juan José Mora del Estado Carabobo.
- Se realizó la evaluación en dólares (USD) debido a que la inversión y las materias primas se manejan bajo esta base, adicionalmente con esta consideración se evita la afectación de los indicadores económicos debido a la variabilidad de la economía interna.



Premisas Financieras

- Período de ejecución de la ingeniería, procura y construcción: 2013 – 2015.
- Tiempo de vida del proyecto: 25 años.
- Nivel de financiamiento: 100 % capital propio. Debido a la magnitud de la inversión, se plantea que el desembolso de capital se obtenga del flujo de caja anual de la empresa.
- Distribución de la inversión: 25 % 2013, 50 % 2014 y 25 % 2015 (CAPEX).
- Todos los precios dentro del modelo económico se consideran constantes, es decir, no se contabiliza la incidencia de la inflación.
- Evolución de la producción de la planta con respecto a la capacidad: 2016: 95 % y del 2017 en adelante: 100 %.
- Fuerza laboral total de la planta de fundición: 12, estas se distribuyen en 2 operadores por turno (6 personas), 1 supervisor para cada turno (3 personas), 2 analistas de comercialización y un gerente general.
- Horas de operación anual: 8000 h/año.
- Capital de trabajo:
 - ✓ 30 días de cuentas por cobrar.
 - ✓ 30 días de cuentas por pagar.
 - ✓ Inventario materia prima: 30 días.
 - ✓ Inventario de catalizadores y aditivos: 60 días.
 - ✓ Inventario producto final: 15 días.
 - ✓ Capital en mano: 15 días de los costos de producción.
 - ✓ Monto de repuestos generales: 1 % del capital total de la planta.
- Depreciación lineal igual a 25 años para todos los equipos.
- Tasa de descuento: 12 % anual.
- Impuestos:
 - ✓ Municipal: 2 % del ingreso bruto de las ventas internas.
 - ✓ LOCTI y Ley Antidroga: 2,5 % del ingreso bruto.



- ✓ ISLR: 34 % del ingreso.
- Gastos Generales, “Overhead”: 50 % del costo total de labor, este valor es promedio en la industria petroquímica y se ha utilizado como referencia en numerosas evaluaciones previas.
- Gastos en mantenimiento anual igual al 3% de la inversión de la planta.
- Seguro anual: 1% de la inversión total de la planta.
- Tarifa de labor promedio: 32.000 US\$/año.
- Costos de materias primas y productos:
 - ✓ Azufre sólido: 127 USD/TM.
 - ✓ Azufre fundido: 158 USD/TM.

El precio de la materia prima se tomó como referencia del valor que actualmente paga la empresa por esta materia prima considerando que se pueda obtener un 10 % de descuento sobre el mismo; el precio del producto es obtenido de acuerdo a las referencias internacionales para Azufre fundido.

4.6.3. Resultados económicos

Los valores mostrados en la Tabla 4.16 representan los costos referenciales, directos e indirectos, asociados a la operación de la planta.

Tabla 4.16. Costos referenciales de operación (MMUSD)

Costos de operación	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026
Costos variables	42,9	45,2	45,2	45,2	45,2	45,2	45,2	45,2	45,2	45,2	45,2
Costos fijos	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,9
Total	43,7	46,0	46,0	46,0	46,0	46,0	46,0	46,0	46,1	46,1	46,1

Por otro lado, en la Tabla 4.17 se presentan los ingresos estimados durante la operación de la planta y el flujo de caja libre, el cual es utilizado para determinar los indicadores financieros y se obtiene posterior a cubrir los gastos de operación.

Tabla 4.17. Ingresos estimados durante la operación de la planta
(MMUSD)

Ingresos	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026
Ingresos Brutos	49,5	52,1	52,1	52,1	52,1	52,1	52,1	52,1	52,1	52,1	52,1
Flujo de Caja Libre	3,6	3,3	1,8	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7

El flujo de caja libre en este proyecto es relativamente bajo debido a que la diferencia entre el precio de la materia prima y del producto terminado es pequeña, lo cual se debe a que el valor agregado sobre el Azufre sólido es simplemente el cambio de fase y comercialmente dicho cambio no tiene mayor impacto sobre el precio final. En esta evaluación se sugiere directamente un 10 % de descuento en la materia prima, valor aceptable y que se puede obtener durante la discusión del contrato de suministro con el proveedor, en caso tal de que esto no se obtenga se debe modificar la evaluación y adaptar las premisas al nuevo escenario.

4.6.4. Indicadores de rentabilidad y análisis de sensibilidad

Según los resultados y premisas presentadas anteriormente y haciendo uso del simulador financiero interno de la empresa, se obtuvieron los siguientes resultados económicos, que sirven para analizar la factibilidad de la propuesta.

Tabla 4.18. Indicadores financieros

Indicador Financiero	Valor
TIR (%)	14,0
VPN (MMUSD)	1,6
Tiempo de Pago (años)	6

Los resultados presentados en la Tabla 4.18 sugieren la factibilidad de la propuesta del sistema de fundición de Azufre sólido y almacenamiento del producto obtenido (Azufre fundido). Valores de TIR por encima del 12 % (TIR = 14 %) favorecen la inversión debido a que se recibirá un mayor retorno de capital gracias a las operaciones de la planta en contraposición a que no se haga ninguna inversión; de igual forma el valor presente neto (VPN), con valor positivo (VPN = 1,6 MMUSD), representa la ganancia que se tendría en el presente en caso de hacer la inversión. Por otro lado, el tiempo de pago obtenido bajo las premisas económicas definidas en la sección anterior y la aplicación del simulador, representa un tiempo prometedor ya que generalmente para la mayoría de plantas petroquímicas se esperan tiempos de recuperación de la inversión por encima de los 10 años.

Ahora bien, el análisis de sensibilidad se hace con la finalidad de determinar la incidencia de la variación de la inversión, precios de materia prima y precios del producto sobre la rentabilidad de la propuesta. Los resultados son mostrados en las Figuras 4.9 y 4.10.

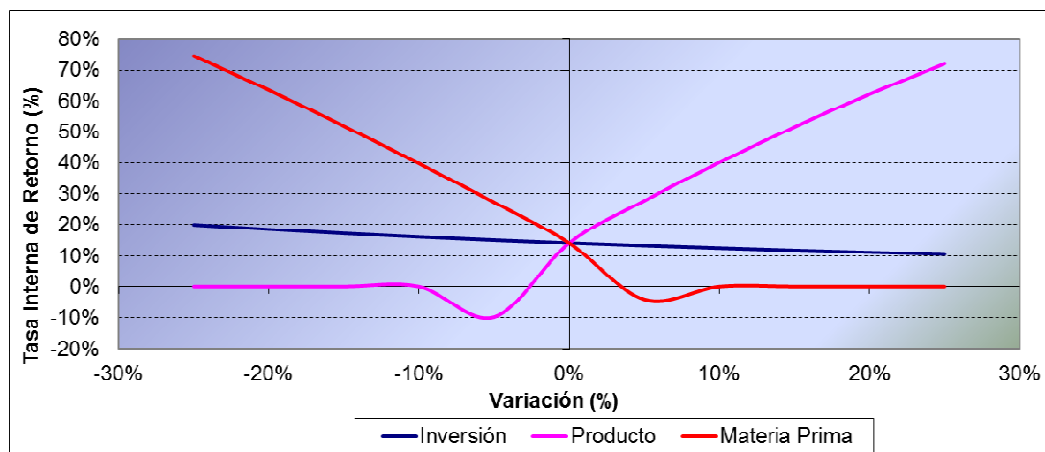


Figura 4.9. Sensibilidad de la inversión, precio del producto y precios de las materias primas sobre la tasa Interna de retorno.

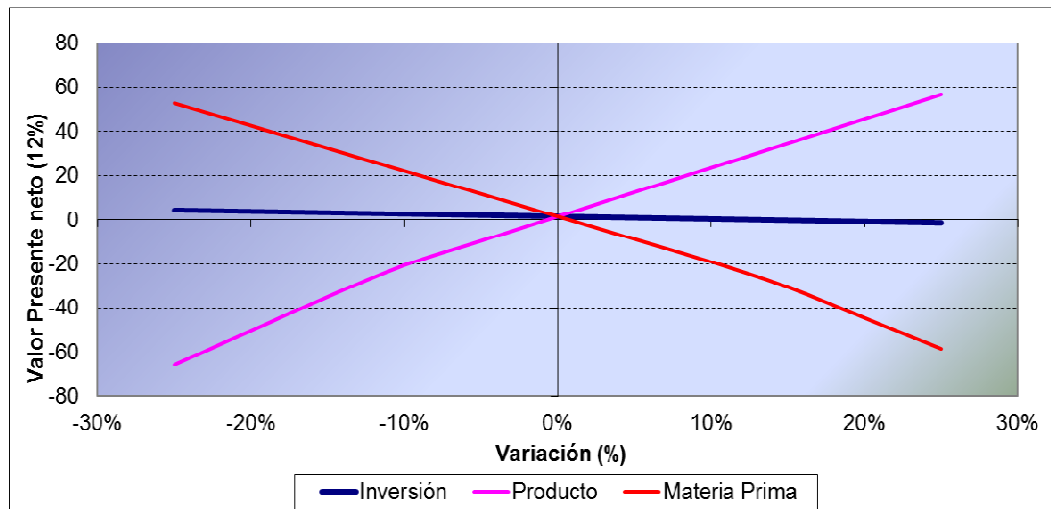


Figura 4.10. Sensibilidad de la inversión, precio del producto y precios de las materias primas sobre el valor presente neto.

La rentabilidad del proyecto, se ve influenciada considerablemente por una disminución o aumento en el precio de venta del producto, si se aumenta éste en un 5%, el proyecto mejora alcanzando valores por encima del 25 %. De igual forma los precios de las materias primas ejercen influencia, logrando mejores resultados con una disminución mínima en el precio de compra. Con respecto al valor presente neto en todos los casos se obtienen resultados similares a los descritos anteriormente.

Por su parte el efecto de la variación de la inversión sobre la rentabilidad del proyecto es menor en comparación con la variación de los precios de producto y materia prima, lo que quiere decir que las variables económicas con mayor influencia en este proyecto son los precios de las materias primas y del producto final.



CONCLUSIONES

1. 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.
2. El sistema de fundición de azufre consta de 6 etapas principales: almacenamiento del azufre sólido, transporte del azufre hasta el tanque de fundición, fundición, bombeo del azufre fundido, filtración del azufre (remoción de impurezas) y almacenamiento final.
3. Las dimensiones determinadas para todos los equipos, en el diseño de la etapa de fundición y almacenamiento, permiten el manejo de 1000 toneladas métricas diarias de azufre, cantidad requerida para el funcionamiento de la planta de ácido sulfúrico.
4. La capacidad de almacenamiento de azufre fundido, permite almacenar el equivalente al requerimiento de cinco días de operación de la planta de ácido sulfúrico.
5. En el sistema de fundición y almacenamiento de azufre, se deben controlar principalmente el caudal de azufre sólido a la entrada del sistema, la temperatura del azufre fundido dentro del tanque de fundición y el nivel de líquido dentro de dicho equipo.
6. La propuesta de un sistema para la fundición y almacenamiento de azufre resulta factible económicamente, de acuerdo a las premisas consideradas durante la investigación, con un valor presente mayor a cero (1,6 MMUSD) y una tasa interna de retorno (14%) mayor a la tasa de descuento considerada en esta investigación.



RECOMENDACIONES

1. Se recomienda profundizar el diseño de los equipos principales presentes en el sistema de fundición y almacenamiento de azufre y con esto continuar con una ingeniería de detalle y un estimado de costos más exacto.
2. Se sugiere evaluar la logística de manejo y transporte de azufre sólido desde los mejoradores de crudo en Anzoátegui, hasta las instalaciones de la planta de ácido sulfúrico en el Estado Carabobo y con esto preparar un plan para el suministro oportuno de la materia prima.
3. Se propone evaluar otras fuentes de azufre en el país, con la finalidad de garantizar la alimentación de la planta de ácido sulfúrico, mediante un balance nacional de esta materia prima, indicando la disponibilidad en el tiempo, el estado físico del mismo y la infraestructura requerida para llevarlo hasta las instalaciones de la planta.
4. Una vez alcanzadas todas las etapas definidas en las guías de proyectos de inversión de la empresa y de acuerdo a los resultados obtenidos, se recomienda darle continuidad a este proyecto ya que se garantizaría el correcto funcionamiento de la planta de Ácido Sulfúrico.
5. Se sugiere ampliar el diseño del sistema de control de todo el sistema de fundición y almacenamiento de Azufre propuesto, con la finalidad de mantener dentro de los valores adecuados todas las variables críticas.
6. Se recomienda incorporar en el diseño, sistemas de seguridad que permitan ejecutar las operaciones de forma segura tanto para las personas como para las instalaciones.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ALFONSO Y ASOCIADOS (2004). **Procesos de Mejoramiento de Petropiar**. Estado Anzoáteguí. Venezuela.
2. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (2012). **Determinación de acidez en azufre**. Referencia: D4569-06.
3. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (2012). **Determinación del porcentaje de azufre por extracción**. Referencia: D4578-06.
4. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (1997). **Determinación del porcentaje de cenizas**. Referencia: D856-91.
5. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (1997). **Determinación del porcentaje de humedad por el método Karl Fischer**. Referencia: D1364-64.
6. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (2012). **Determinación del tamaño de partícula del azufre por tamizado (seco)**. Referencia: D4570-02.
7. AMOS, Scott (2007). **Skills & Knowledge of cost engineering**. Quinta edición. AACE International. Estados Unidos.
8. BRIDGESTONE CORPORATION (2000). **Conveyor Belt Design Manual**. Departamento de ventas de gomas. Tokio. Japón.



9. GAO, Hongshuai y Otros (2009). **Desulfurization of Diesel Fuel by Extraction with Lewis-Acidic Ionic Liquid**. Instituto de Ingeniería de Procesos. Academia China de Ciencias.
10. HANSSON, Rasmus (2010). **Increased heat recovery process at the sulphuric acid plant at Kemira Kemi AB**. Departamento de Ingeniería Química. Instituto de Tecnología de Londrés.
11. HERNÁNDEZ, R. y otros (1997). **Metodología de la Investigación**. McGraw-Hill Interamericana de México, S.A. de C.V. México.
12. HURTADO, B. (2000). **Metodología de la Investigación Holística**. Primera Edición. Fundación SYPAL. Caracas. Venezuela.
13. LYONS, James R. (2008). **An estimate of the equilibrium speciation of sulfur vapor over solid sulfur and implications for planetary atmospheres**. Departamento de Ciencias de la Tierra y el Espacio. Universidad de California.
14. MCCABE, Warren L. y otros. (2007). **Operaciones Unitarias en Ingeniería Química**. (Séptima Edición). McGraw Hill. Universidad Iberoamericana, Ciudad de México. México.
15. MÜLLER, H. (2005). **Sulfuric Acid and Sulfur Trioxide**. Enciclopedia Ullmann de Química Industrial.
16. MOHAMED, Abdel-Mohsen O. y EL GAMAL, Maisa (2007). **Sulfur Based Hazardous Waste Solidification**. Environ Geol. Springer-Verlag.
17. PDVSA (1991). **Preparación de diagramas de proceso**. Manual de ingeniería de diseño, Volumen 15, Procedimientos de Ingeniería.



18. PDVSA (1997). **Almacenamiento en silos y tolvas**. Manual de diseño de proceso, manejo de materiales sólidos a granel.
19. PDVSA (2009). **Manual de Operaciones de la Unidad Claus en Anzoátegui**.
20. PDVSA (2009-2). **Materiales para tuberías**. Manual de ingeniería de diseño, Volumen 13-I Especificación de Ingeniería.
21. PDVSA (2010). **Aislamiento térmico para tuberías y equipos de servicio en caliente**. Manual de ingeniería de diseño, Volumen 10 Especificación de Ingeniería.
22. PETERS, Max S. y TIMMERHAUS, Klaus D. (1991). **Plant design and economics for chemical engineers**. Cuarta Edición. McGraw-Hill. Singapur.
23. PETROQUÍMICA DE VENEZUELA, S.A. (2009). **ITB Volume III, Sulfuric Acid Plant III**. Complejo Petroquímico Morón. Morón. Carabobo.
24. PETROQUÍMICA DE VENEZUELA, S.A. (1984). **Planta de Ácido Sulfúrico, Manual de Operación**. Complejo Petroquímico Morón. Morón. Carabobo.
25. PERRY, Robert y GREEN, Don W. (2001). **Manual del Ingeniero Químico**. Sexta Edición. Tomo 3. McGraw-Hill.
26. SURESH, B. (2009). **Sulfur**. CEH Marketing Research Report. SRI Consulting.



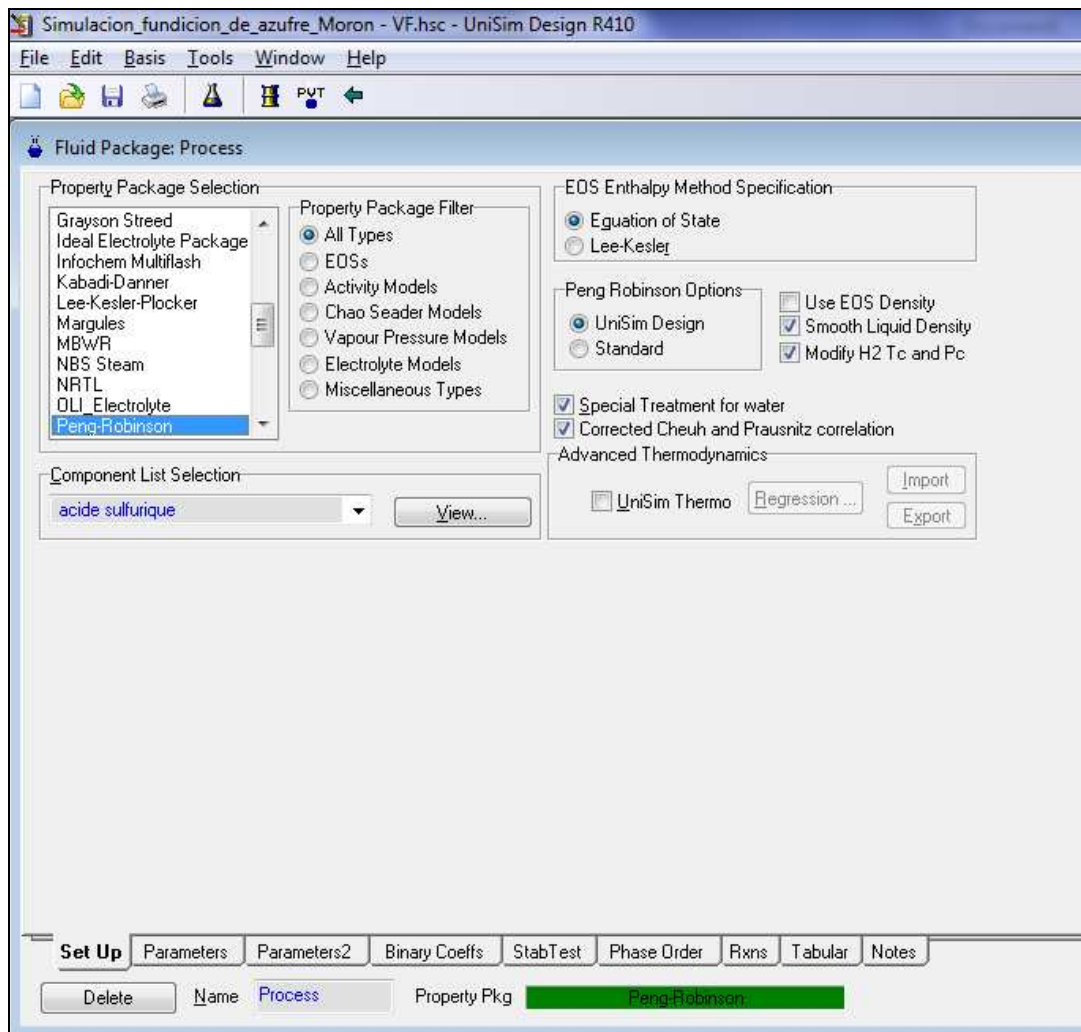
27. SUTHERLAND, Ken (2008). **Filters and Filtration Handbook**. Quinta edición. Elsevier. Oxford, Reino Unido.

28. ZARENEZHAD, Bahman (2008). **Consider advanced catalyst for Claus units**. Ministerio de Ciencias, investigación y tecnologías. Universidad de Semman.



APÉNDICES

Apéndice A. Selección del paquete termodinámico en el software para la simulación del sistema de fundición y almacenamiento de azufre



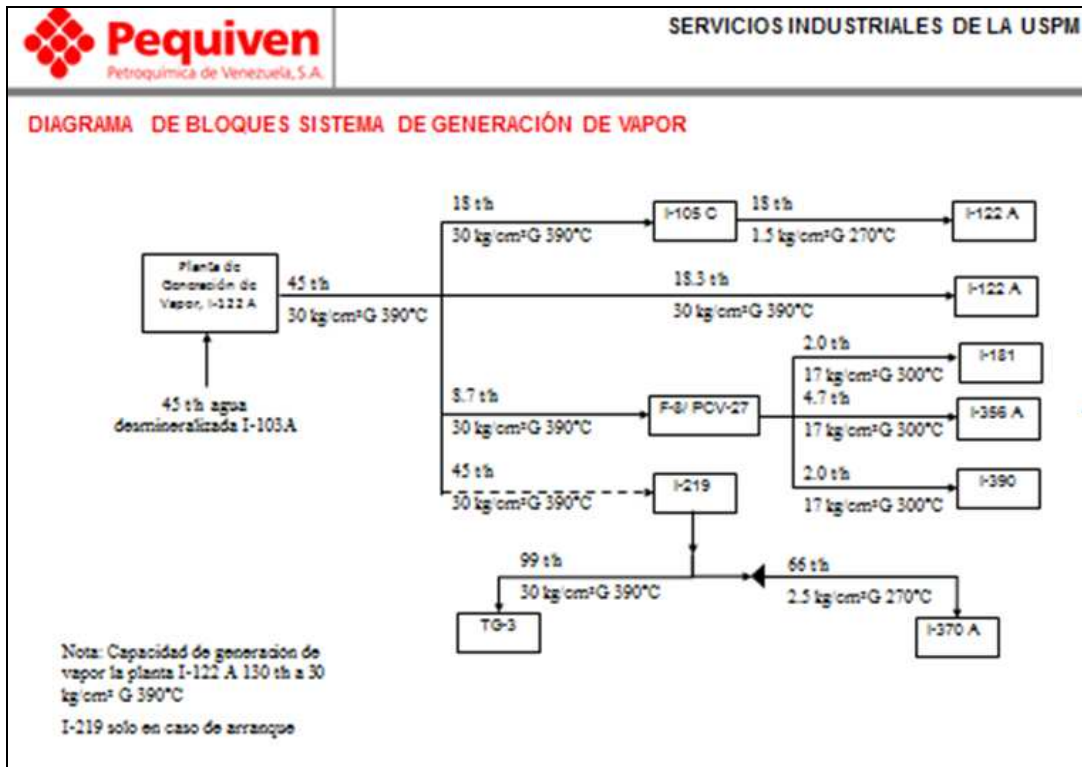
Apéndice B. Composición a la entrada del silo de alimentación

The screenshot displays the UniSim Design R410 interface. The main window shows a process flow diagram (PFD) with a stream entering a silo labeled 'Silo azufre'. A 'Worksheet' dialog box is open, showing the composition of the stream. The worksheet has columns for 'Mass Fractions' and 'Aqueous'. The composition is as follows:

Component	Mass Fractions	Aqueous
Oxygen	0.000000	
Nitrogen	0.000000	
H2O	0.014999	
S_Liq_150	0.000000	
Azufre_solido*	0.984792	
Carbon*	0.000010	
Impurezas*	0.000200	

The 'Total' mass fraction is 1.000000. The worksheet also includes buttons for 'Edit...', 'Edit Properties...', and 'Basjs...'. The 'Worksheet' tab is selected, and the 'Attachments' and 'Dynamics' tabs are also visible.

Apéndice C. Servicios industriales del Complejo Petroquímico Morón





Apéndice D. Balances de masa y energía del sistema de fundición y almacenamiento de azufre

Name	11	4	6	13	1	2	10	3	17	18	5	15	9
Mass Flow [tonne/h]	0.0000	40.53	40.53	31.40	40.53	40.53	0.0000	40.53	0.0000	0.0000	40.53	31.40	0.6164
Description	Aire_en_la_fosa	Azufre_fund_bc	Azufre_liq_filtro	Vapor_fundicior	Azufre_alim_sic	Azufre_alim_cin	Aire_en_el_silo	Azufre_alim_sic			Azufre_fund	Condensado_ic	Impurezas_filtro
Temperature [C]	140.0	140.0	138.2	300.0	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	138.1	100.0	140.0
Mass Density [kg/m3]	0.9916	1734	1735	6.582	2038	2038	0.7479	2038	2038	2038	1735	958.5	0.5424
Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h]	0.0000	22.66	22.66	31.46	19.89	19.89	0.0000	19.89	0.0000	0.0000	22.66	31.46	0.6120
Phase Fraction (Vapour Phase)	1.0000	0.0000	<empty>	1.0000	<empty>	0.0000	1.0000	<empty>	<empty>	<empty>	<empty>	<empty>	0.9966
Phase Fraction (Solid Phase)	0.0000	0.0001	0.0001	<empty>	0.9736	0.9736	0.0000	0.9736	0.9736	0.9736	0.0001	<empty>	0.0034
Master Comp Mass Frac (Azufre)	0.000000	0.000000	0.000000	***	0.984792	0.984792	0.000000	0.984792	0.984792	0.984792	0.000000	***	0.000000
Master Comp Mass Frac (S_Liq_)	0.984998	0.984792	0.984792	***	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.984792	***	0.000000
Master Comp Mass Frac (Carbon)	0.000000	0.000010	0.000010	***	0.000010	0.000010	0.000000	0.000010	0.000010	0.000010	0.000010	***	0.000057
Master Comp Mass Frac (Impure)	0.000000	0.000200	0.000200	***	0.000200	0.000200	0.000000	0.000200	0.000200	0.000200	0.000200	***	0.013149
Pressure [kPa]	101.3	101.3	2681	1667	101.3	101.3	101.3	101.3	101.3	101.3	2771	250.0	101.3
Enthalpy Estimate	-3081	-7.264e+004	-7.255e+004	-2.322e+005	-8580	-8580	-2.411e+005	-8580	-8580	-8580	-7.255e+004	-2.793e+005	-2.362e+005
Viscosity [cP]	6.283e-003	<empty>	<empty>	2.011e-002	<empty>	<empty>	0.1216	<empty>	<empty>	<empty>	<empty>	0.2819	<empty>
Name	7	12	8	14	16	*** New **							
Mass Flow [tonne/h]	39.91	0.0000	39.91	0.4774	0.4774								
Description	Azufre_liq_filtroc	Aire_en_el_tancc	Azufre_liq_a_laa	Vapor_chaquet	Condensado_cll								
Temperature [C]	119.7	140.7	140.7	300.0	100.0								
Mass Density [kg/m3]	1769	17.97	1755	6.582	958.5								
Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h]	22.05	0.0000	22.05	0.4784	0.4784								
Phase Fraction (Vapour Phase)	<empty>	1.0000	0.0000	1.0000	<empty>								
Phase Fraction (Solid Phase)	<empty>	<empty>	<empty>	<empty>	<empty>								
Master Comp Mass Frac (Azufre)	0.000000	0.000000	0.000000	***	***								
Master Comp Mass Frac (S_Liq_)	1.000000	1.000000	1.000000	***	***								
Master Comp Mass Frac (Carbon)	0.000000	0.000000	0.000000	***	***								
Master Comp Mass Frac (Impure)	0.000000	0.000000	0.000000	***	***								
Pressure [kPa]	1200	1200	1200	1667	250.0								
Enthalpy Estimate	-6.809e+004	-2056	-6.709e+004	-2.322e+005	-2.793e+005								
Viscosity [cP]	11.26	6.531e-003	8.076	2.011e-002	0.2819								

Material Streams Compositions Energy Streams Unit Ops

ProductBlock: 11
Fosa de fundicion

Horizontal Matrix

Fluid Pkg: All

Include Sub-Flowsheets

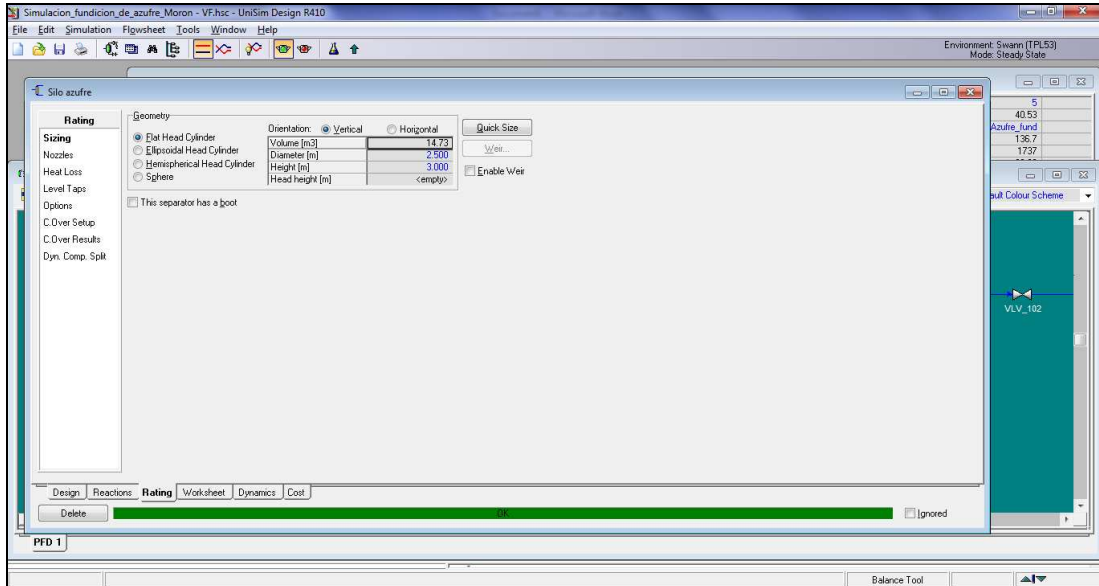
Show Name Only

Number of Hidden Objects: 2

Balance Tool



Apéndice E. Parámetros de diseño del silo de almacenamiento





Apéndice F. Tamaño del material a transportar y ancho mínimo de la cinta

Minimum Belt Width (mm)	Lump Sizes (mm)	
	A Uniform	B Mixed
400	64	100
450	75	125
500	85	150
600	110	200
650	125	225
750	145	275
800	157	300
900	180	350
1,000	203	400
1,050	215	425
1,200	250	500
1,400	297	600
1,600	345	700
1,800	380	800
2,000	440	900
2,200	500	1,000
2,400	550	1,100
2,600	600	1,200
2,800	650	1,300
3,000	700	1,400
3,150	750	1,500

Fuente: Bridgestone Corporation, 2000.



Apéndice G. Velocidad máxima de la cinta transportadora

unit: m/min.

Belt Width (mm)	A	B	C
400	180	150	150
450	210	180	180
500	240	180	180
600	240	210	200
650	240	210	200
750	270	240	220
800	270	240	220
900	300	250	240
1,000	300	250	240
1,050	300	250	240
1,200	330	300	270
1,400	360	330	270
1,600	360	330	270
1,800	—	360	300
2,000	—	360	300
2,200 ~ 3,000	—	360	300

A. Grains and other free-flowing materials
B. Overburden (run of mine coal and other such moderately abrasive materials)
C. Hard ore, rock and other very abrasive materials

Fuente: Bridgestone Corporation, 2000.

**Apéndice H. Ángulo máximo de inclinación de la cinta transportadora**

Material	Lump Size	Maximum Permissible Incline/Decline Angle (°)
Coal	Over 100 mm	15
	Under 100 mm	16
	Non-uniform	18
	Dry fine	20
	Wet fine	22
Coke	Uniform	17
	Non-uniform	18
	Fine	20
Concrete	150 mm	12
	100 mm	20
	50 mm	24
Rock	Over 100 mm	15
	10 ~ 100 mm	16 ~ 18
	Under 10 mm	20
Ore	Over 100 mm	18
	Under 100 mm	20
Limestone	Over 100 mm	18
	Under 100 mm	20
Lime	Fine	23
Cement	Fine	22
Sulphur	Fine	23
Phosphate Ore	Over 100 mm	15
	Under 100 mm	25
	Fine	30
Gravel	Washed, uniform	12
	Unwashed, non-uniform	15
	Non-uniform	18
Sand	Dry	15
	Wet	20
	For casting (foundry)	24
Earth	Dry	20
	Wet	22
Wood	Chips	27
	Boxes	15 ~ 25
Salt		20

Fuente: Bridgestone Corporation, 2000.



**Apéndice I. Coeficiente de fricción de los rodillos y longitud horizontal
ajustada de la cinta**

f	ℓ_0 (m)	Conveyor Conditions
0.03	49	a) Conveyors with poor alignment; temporary or portable conveyors b) Conveyors operating in extremely cold conditions with frequent stopping and starting, or extended operations at or below -40°C .
0.022	66	Permanent or other conveyors with good alignment and normal, regular maintenance.
0.012	156	In cases where the braking power of a downhill conveyor must be calculated.

Note: When (f) has values other than those given above, the (ℓ_0) can be calculated from the following formula:

$$\ell_0 = \frac{0.77931}{f - 0.006436} + 15.93$$

Fuente: Bridgestone Corporation, 2000.

**Apéndice J. Peso de las partes móviles de la cinta**

Belt Width (mm)	Wc (kg/set)	W _r (kg/set)
400	6.6	5.0
450	7.1	5.4
500	7.5	5.9
600	8.3	6.8
650	9.0	7.3
750	13.2	11.6
800	13.9	12.2
900	15.1	13.4
1,000	19.6	18.0
1,050	21.3	18.9
1,200	23.6	21.1
1,400	36.6	32.6
1,600	41.4	36.6
1,800	47.4	42.5
2,000	52.2	46.5
2,200	75	65
2,400	81	70
2,600	86	75
2,800	114	100
3,000	121	106
3,150	128	111

Fuente: Bridgestone Corporation, 2000.



Apéndice K. Inclinación de los rodillos

Belt Width (mm) *	Carrier Idler Pitch " ℓ_c " (m)		Return Idler Pitch " ℓ_r " (m)
	Under 1.6	Over 1.6	
400	1.35	1.35	3.00
450	1.35	1.20	3.00
500	1.35	1.20	3.00
600	1.20	1.10	3.00
650	1.20	1.10	3.00
750	1.20	1.00	3.00
800	1.20	1.00	3.00
900	1.00	1.00	3.00
1,000	1.00	1.00	3.00
1,050	1.00	1.00	3.00
1,200	1.00	1.00	3.00
1,400	1.00	1.00	3.00
1,600	1.00	1.00	3.00
1,800	1.00	1.00	3.00
2,000	1.00	1.00	2.40
2,200	1.00	1.00	2.40
2,400	1.00	1.00	2.40
2,600	1.00	1.00	2.40
2,800	1.00	1.00	2.40
3,000	1.00	1.00	2.40
3,150	1.00	1.00	2.40

* Apparent specific gravity of material. (ton/m³)

Fuente: Bridgestone Corporation, 2000.



Apéndice L. Peso estándar de la cinta transportadora

Belt Width (mm)	Belt Weight (kg/m)	Approx. Belt Thickness (mm)
400	4.5	9
450	7.0	12
500	7.5	
600	9.0	
650	10.3	
750	13.0	13
800	13.8	
900	15.5	
1,000	20.5	17
1,050	23.0	
1,200	26.0	
1,400	33.0	18
1,600	38.0	
1,800	46.0	20
2,000	51.0	
2,200	56.0	
2,400	61.0	
2,600	66.0	
2,800	71.0	
3,000	77.0	
3,150	81.0	

Fuente: Bridgestone Corporation, 2000.



Apéndice M. Potencia motriz del apilador

Tripper Driving Power "Pt" Unit: kw

Belt Width (mm)	Tripper Type	
	Stationary	Movable
400 450 500 600 650	0.75	1.25
750 800 900	1.25	2.00
1,000 1,050 1,200	2.15	3.15
1,400 1,600	3.45	5.00
1,800 2,000	4.40	6.30
2,200 2,400	5.40	7.40
2,600 2,800	6.20	8.50
3,000 3,150	6.70	9.60

Fuente: Bridgestone Corporation, 2000.



Apéndice N. Coeficiente de fricción entre las poleas y la cinta transportadora

Type of Drive Pulley	Surface Condition of Drive Pulley	Friction Coefficient "u"
Bare Steel Pulley	Dirty & Wet	0.1
	Moist	0.1~0.2
	Dry	0.3
Grooved and Rubber-Lagged Pulley	Dirty & Wet	0.2
	Moist	0.2~0.3
	Dry	0.35

Fuente: Bridgestone Corporation, 2000.



Apéndice O. Ángulo de contacto entre las poleas y la cinta transportadora

Type of Drive	Angle of Wrap (degree)
(A) Single Drive	180
(B) Single Drive with snub pulley	200 ~ 220
(C) Tandem Type Single Drive	220 ~ 240
(D) Tandem Drive	400 ~ 440
(E) Dual Drive	Primary 170 ~ 220, Secondary 190 ~ 220

Fuente: Bridgestone Corporation, 2000.



Apéndice P. Factor de seguridad de la cinta transportadora

Time Cycle (min)	Material Lump Size	A		B	
		Small	Large	Small	Large
Under 1.0		11	11	11	12
1.0 ~ 3.0		10	11	11	11
3.0 ~ 10.0		9	9	10	10
Over 10.0		8	8	8	8

Fuente: Bridgestone Corporation, 2000.



Apéndice Q. Selección del material de la cinta transportadora

Polyester Fabric	Nylon Fabric
EP160/2	NF160/2
EP200/2	NF200/2
EP250/2	NF250/2
EP315/2~3	NF315/2~3
EP400/2~4	NF400/2~4
EP500/2~4	NF500/2~4
EP630/3~4	NF630/3~4
EP800/3~5	NF800/3~5
EP1000/4~5	NF1000/4~5
EP1250/4~5	NF1250/4~5
EP1600/5	NF1600/4~5
	NF2000/4~5
	NF2500/5~6
	NF3150/6

Fuente: Bridgestone Corporation, 2000.



Apéndice R. Tensión de trabajo de la cinta transportadora

Tension Rating (kN/Mply)	Nylon Fabric	Vinyon Fabric	Polyester Fabric
5	NF-50	VF-50	—
7.5	75	75	—
10	100	100	—
12.5	125	125	—
15	150	150	EP-125
16	160	160	125
20	200	200	160
25	250	250	250
30	300	300	250
35	350	350	315
40	400	400	—
45	450	—	—
50	500	—	—
60	600	—	—
70	700	—	—

Note: The safety factor is 10 at one-ply indication.

Fuente: Bridgestone Corporation, 2000.



Apéndice S. Espesor de la capa de goma superior en la cinta

Material	Lump Size	Time Cycle	Under 0.2	0.2~0.4	0.4~1.0	Over 1.0
A	SS		1	1	1	1
	S		3	2	2	2
	M		5	4	3	3
	L		6	5	5	5
B	SS		2	2	2	2
	S		3	3	3	3
	M		5	5	4	4
	L		7	6	5	5
C	SS		4	3	3	3
	S		6	5	4	4
	M		7	6	6	5
	L		9	8	8	7

Notes:

a) Lump Size SS: Minute (Under 15mm)
 S: Small (15 ~ 50mm)
 M: Medium (50 ~ 150mm)
 L: Large (Over 150mm)

b) Rubber Cover 1: 1.5 ~ 2.5mm
 2: 2.0 ~ 3.5mm
 3: 3.0 ~ 4.5mm
 4: 3.5 ~ 5.0mm
 5: 4.0 ~ 5.5mm
 6: 5.0 ~ 6.5mm
 7: 6.0 ~ 8.0mm
 8: 7.0 ~ 9.0mm
 9: 8.0 ~ 10.0mm

c) Materials A: Grain, paper, pulp, chips, soda ash, potter's clay, charcoal, lime
 B: Sand, moulding sand, salt, cement, coal timber, debris, borax
 C: Limestone, gravel, slag, crushed stone, copper ore, iron ore, phosphate rock, manganese ore, dolomite, sintered ore, clinker, coke, granite, carborundum, cullet (refuse glass).

Fuente: Bridgestone Corporation, 2000.



Apéndice T. Ángulo de los rodillos y configuración

Carrier Type	Trough Angle	Surcharge Angle (degree)		
		10	20	30
Flat	0	0.0295	0.0591	0.0906
3-Idler rolls trough	10	0.0649	0.0945	0.1253
	15	0.0817	0.1106	0.1408
	20	0.0963	0.1245	0.1538
	25	0.1113	0.1381	0.1661
	30	0.1232	0.1488	0.1754
	35	0.1348	0.1588	0.1837
	40	0.1426	0.1649	0.1882
	45	0.1500	0.1704	0.1916
	50	0.1538	0.1725	0.1919
	55	0.1570	0.1736	0.1907
5-Idler rolls trough	60	0.1568	0.1716	0.1869
	30	0.1128	0.1399	0.1681
	40	0.1336	0.1585	0.1843
	50	0.1495	0.1716	0.1946
	60	0.1598	0.1790	0.1989
	70	0.1648	0.1808	0.1945

Fuente: Bridgestone Corporation, 2000.



Apéndice U. Determinación de los diámetros de la polea

Classification of Pulley		A	B	C
Minimum Pulley Diameter (mm)		125 K·n	100 K·n	75 K·n
Range of Application	Type of Pulley	Drive Pulley Head Pulley	Take-up Pulley Tail Pulley	Snub Pulley Bend Pulley
	Belt Tension at Pulley	Over 80%	Under 80% but over 60%	Under 60%

n : Number of plies
K : Pulley factor

Fuente: Bridgestone Corporation, 2000.



Apéndice V. Factor de polea “K”

Serial No. of Fabric	K	Serial No. of Fabric	K
NF-50 ~ 125	0.80	EP-125	1.15
NF-150 ~ 160	0.90	EP-160	1.25
NF-200	1.00	EP-200	1.60
NF-250	1.15	EP-250	1.80
NF-300	1.30	EP-315	2.00
NF-350	1.40	VF-50 ~ 160	1.20
NF-400	1.45	VF-200	1.30
NF-450	1.55	VF-250	1.50
NF-500	1.60	VF-300	1.70
NF-600	1.80	VF-350	1.95
NF-700	2.10	VF-400	2.10

Fuente: Bridgestone Corporation, 2000.



Apéndice W. Parámetros de diseño de la cinta transportadora

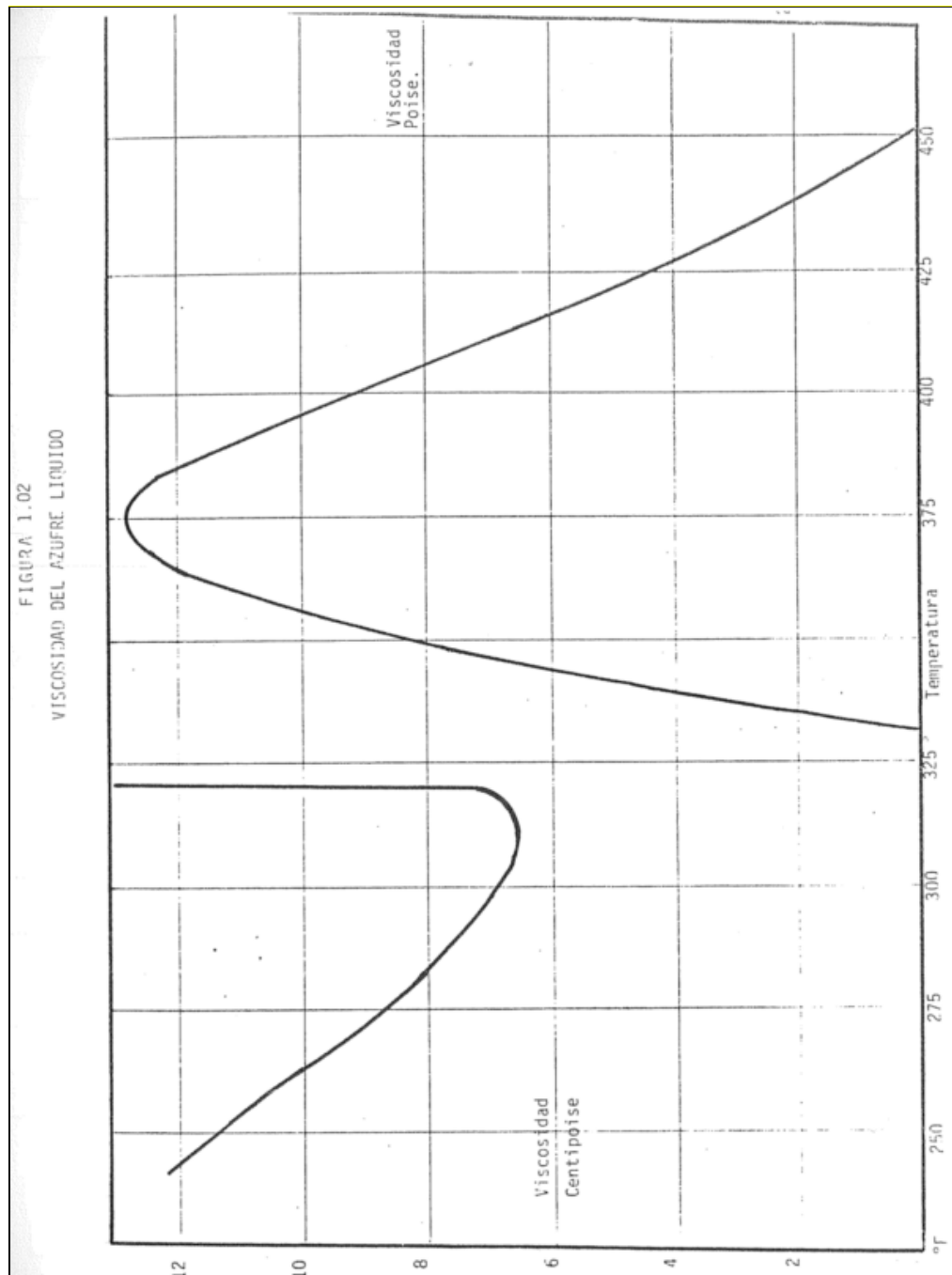
The screenshot displays the UniSim Design R410 interface for a conveyor belt simulation. The main window is titled "Cinta transportadora" and shows the "Rating" tab. The "Conveyor Specs" section is active, with the "Belt" option selected. The parameters are as follows:

Parameter	Value
Specified Speed [m/s]	3.000
Acceleration Speed [m/s ²]	0.200
Outlet Excess Percent [%]	0.00
One Side Length [m]	50.00
Buffer Size	50
Belt Capacity [kg/m]	675.5

The interface also shows a process flow diagram on the right with components labeled P-100, VLV_102, and inicio_bomba. A data table in the top right corner shows flow rates and levels for various streams.

Stream	Flow Rate [kg/h]	Level [m]
17	0.0000	40.53
18	0.0000	25.00
5	25.00	20.38
Azuero_Bund	20.38	17.37

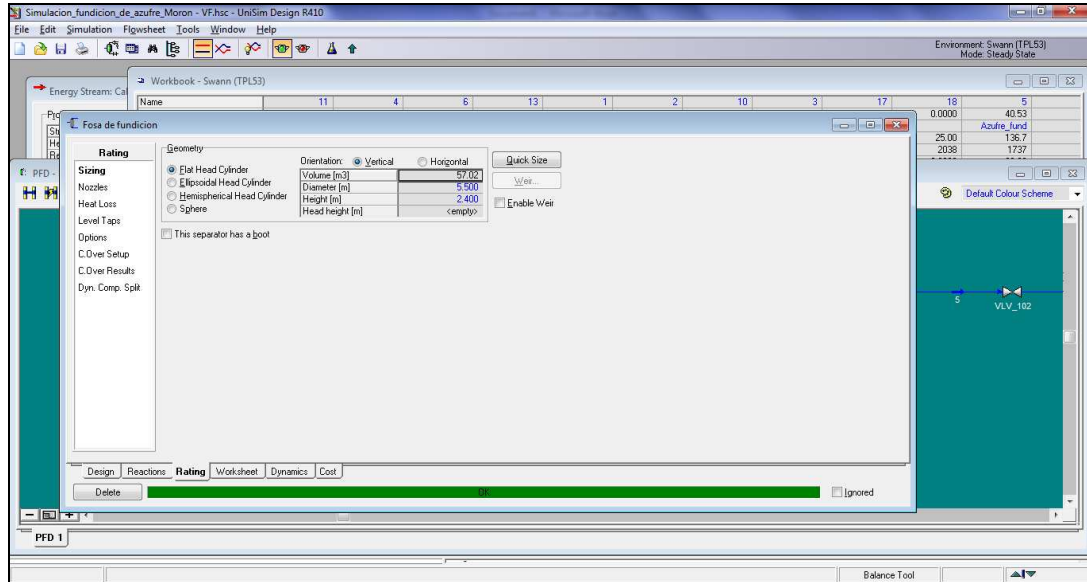
Apéndice X. Comportamiento de la viscosidad del azufre en función de la temperatura



Fuente: PETROQUÍMICA DE VENEZUELA, S.A. (1984).



Apéndice Y. Parámetros de diseño del tanque de fundición





Apéndice Z. Premisas y parámetros de diseño de la bomba de azufre

The image displays two screenshots from the UniSim Design R410 software interface, illustrating the design and simulation of a sulfur pump (P-100).

Top Screenshot: Pump Design Parameters

Generate Curve Options - P-100

Required Data	Value
Design Capacity (m ³ /h)	27.00
Design Head (m)	20.00
Design Efficiency	95.00

Optional Curve Shape Data

Parameter	Value
Design Flow Factor	0.0000
Design Head Factor	2.00 (Variable type: Head)
Design Efficiency Factor	0.9000
Design Speed (rpm)	1500
Low Speed (% of design speed)	60.00
Low Low Speed (% of design speed)	30.00

Process Flow Diagram (PFD 1)

The diagram shows a sulfur pump (P-100) connected to a storage tank (LI-100) and a filter (Filtro). The pump is driven by a motor (P-100). The flow is controlled by a valve (VLV_102). The pump is labeled "Potencia_bomba".

Bottom Screenshot: Simulation Results

The bottom screenshot shows the simulation results for the pump (P-100). The "Dynamics" tab is active, displaying the following specifications:

Parameter	Value
Head (m)	20.00
Flow (m ³ /h)	27.00
Speed (rpm)	1500
Efficiency (%)	95.00
Pressure set (kPa)	2669
Motor Power (kW)	1.125e+002
Flow (m ³ /h)	27.378

The "Dynamic Specifications" table also shows the following values:

Parameter	Value
Head (m)	20.00
Flow (m ³ /h)	27.00
Speed (rpm)	1500
Efficiency (%)	95.00
Pressure set (kPa)	2669
Motor Power (kW)	1.125e+002
Flow (m ³ /h)	27.378

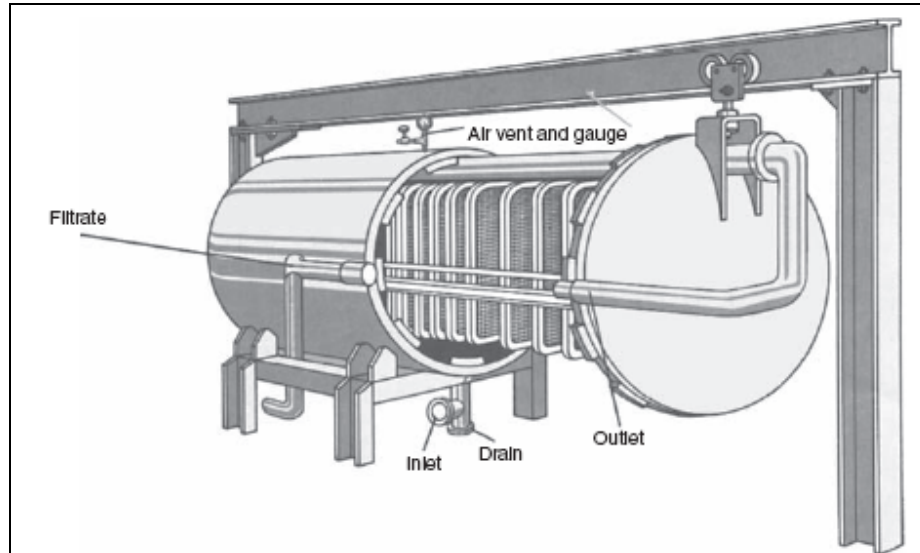
The "Dynamic Specifications" table also shows the following values:

Parameter	Value
Head (m)	20.00
Flow (m ³ /h)	27.00
Speed (rpm)	1500
Efficiency (%)	95.00
Pressure set (kPa)	2669
Motor Power (kW)	1.125e+002
Flow (m ³ /h)	27.378

The "Dynamic Specifications" table also shows the following values:

Parameter	Value
Head (m)	20.00
Flow (m ³ /h)	27.00
Speed (rpm)	1500
Efficiency (%)	95.00
Pressure set (kPa)	2669
Motor Power (kW)	1.125e+002
Flow (m ³ /h)	27.378

Apéndice AA. Filtro horizontal con un arreglo interno vertical



Fuente: Sutherland, 2008.



Apéndice BB. Resumen de las características de los diferentes medios filtrantes

Media	Filter action	Normal minimum cut-off μm	Advantages	Absolute cut-off	Disadvantages	Remarks/typical application
Woven wire	Surface	Down to 6	Performance controlled by weave and mesh. High strength.	Yes	More expensive than cloth or paper	Widely used in coarse, medium and fine mesh.
Mineral wools	Depth	Down to 0.1	High permeability, suitable for ultra-fine filtering with micro-diameter fibres and suitable backing – suitable for high temperatures.	Yes	Asbestos fibres can represent a health hazard. Flow velocities must be kept low. Not particularly suitable for filtering liquids.	Ultra-fine filtering of air and gases.
Glass fibre	Depth	Down to 1 or better	Properties can be controlled and graduated during manufacture. Suitable for high temperatures.			Filter pads or blankets for air filters. Microglass sheets for HEPA filters.
Diatomaceous earth	Depth		Very effective for fine filtering with low resistance.	No	Normally suitable for use only as a precoat, but can be rendered in sheet form with binder.	Precoat filters, particularly suitable for clarifying.
Perlite	Depth		Low wet density. Fine filtering capability with low flow resistance.	No	As for diatomaceous earth, but normally needs to be used in thicker layers.	Precoat filters.
Activated charcoal	Adsorbent	Removes vapours, odours etc.			Granular product, needs containing in a suitable housing.	Final filter for air or water, chemical treatment, etc.

(Continued)

Fuente: Sutherland, 2008.



Apéndice CC. Parámetros de diseño del tanque de almacenamiento

Simulation_fundicion_de_azufre_Moron - VF.hsc - UniSim Design R410

Environment: Swann (TPL53)
Mode: Steady State

Workbook - Swann (TPL53)

Name	11	4	6	13	1	2	10	3	17	18	5
Mass Flow [tonne/h]	0.0000	40.53	40.53	31.40	40.53	40.53	0.0000	40.53	0.0000	0.0000	40.53
Description	Aire_en_la_los	Azufre_fund_bc	Azufre_lq_etro	Vapor_fundicion	Azufre_alm_atk	Azufre_alm_cin	Aire_en_el_eto	Azufre_alm_los			Azufre_fund
Heat Flow [kW]	140.0	140.0	136.8	300.0	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	136.7
Temperature [C]											1737

Tanque de almacenamiento

Rating

Geometry

Orientation: Vertical Horizontal

Volume [m3]: 2680

Diameter [m]: 21.25

Height [m]: 7.500

Head height [m]: <empty>

Quick Size

Weir

Enable Weir

This separator has a boot

Design | Reactors | Rating | Worksheet | Dynamics | Cost

Delete

Balance Tool

**Apéndice DD. Materiales para aislamiento según temperatura**

Tipo de Aislamiento	Norma	Clasificación (Tipo)	Temperatura Máxima de Uso
Silicato de Calcio (ver punto 10.1.1)	ASTM C-533	Tipo I	649°C (1200°F)
		Tipo II	927°C (1700°F)
Fibra Mineral (ver punto 10.1.2)	ASTM C-553	Tipo IV	454°C (850°F)
		Tipo V y VI	538°C (1000°F)
		Tipo VII	649°C (1200°F)
	ASTM C-592	Tipo I	454°C (850°F)
		Tipo II y III	649°C (1200°F)
	ASTM C-1393	Tipo III	454°C (850°F)
		Tipo IV	538°C (1000°F)
	ASTM C-612	Tipo II	454°C (850°F)
		Tipo III	538°C (1000°F)
		Tipo IV	649°C (1200°F)
		Tipo V	982°C (1800°F)
	ASTM C-547	Tipo I	454°C (850°F)
Tipo II y III		649°C (1200°F)	
Tipo IV		538°C (1000°F)	
Tipo V		760°C (1400°F)	
Fibra Cerámica (ver punto 10.1.3)	ASTM C-892	Tipo I	732°C (1350°F)
		Tipo II	871°C (1600°F)
		Tipo III	1316°C (2400°F)
		Tipo IV	1427°C (2600°F)
		Tipo V	1649°C (3000°F)
Vidrio Celular (ver punto 10.1.5)	ASTM C-552	Tipo I, II, III y IV	427°C (800°F)
Perlita Expandida (ver punto 10.1.6)	ASTM C-610	-	649°C (1200°F)

Fuente: PDVSA, 2010.



Apéndice EE. Código del aislante indicado en el DTI

Código	Tipo de Aislamiento Requerido
(F)	Aislamiento para Conservación Total del calor.
(P)	Aislamiento para Protección del Personal.
(T)	Aislamiento para Trazado de Vapor
(E)	Aislamiento para Trazado Eléctrico
(S)	Aislamiento Especial
(M)	Aislamiento de Temperatura Dual
(V)	Aislamiento Acústico

Fuente: PDVSA, 2010.



Apéndice FF. Especificación de la línea de azufre fundido

ESPECIFICACIÓN DE LÍNEA AA8		
CLASE 150 RF – ACERO AL CARBONO CON CAMISA		
SERVICIO (NOTA 1)	Ver Índice de Servicio	
LÍMITES DE PRESIÓN/TEMPERATURA		
	Tubería de núcleos: 836 kPa (121 psi) a 149 °C (300 °F) Tubería con camisa: 1035 kPa (150 psi) a 180 °C (356 °F)	
CORROSIÓN PERMITIDA	Tubería de núcleos 3,175 mm (0,125") Tubería de Camisa 1,587 mm (0,0625")	
TUBERIA (NOTAS 5 y 7)		Tubería de Núcleos, ver tabla anexa para dimensionamiento
	1" a 2"	Sch. 80 Extremo plano A106 Gr.B, sin costura
	3" a 10"	Sch. 40 Extremo biselado A53 Gr.B, sin costura
	12" a 16"	Std. Extremo biselado A53 Gr.B, sin costura
		Tubería con camisa
	2"	Sch. 80 Extremo plano A106 Gr.B, sin costura
	3" a 10"	Sch. 40 Extremo biselado A53 Gr.B, sin costura
	12" a 20"	Std. Extremo biselado A53 Gr.B, sin costura
NIPLES	1/2" a 2"	Sch. 80, A106 Gr.B, sin costura
BRIDAS	Clase 150 RF, A105	
	1" a 20"	Deslizante reductora, maquinada para tamaño de tubería de núcleos. Camisa soldada por detrás de la brida.
ACCESORIOS	A105	
	1/2" a 2"	Acoples de enchufe Soldado 3000# para venteo, drenaje y conexiones de instrumentos.
	1/2" a 2"	Acople de roscas para 3000# para desviaciones.
(NOTA 4)	A234 Gr. WPB	
	1" a 20"	Soldado a tope sin costura, Sch. maquinado para acoplarse a tuberías de núcleos ID: Las eles de camisa serán SR.
EMPAQUETADURAS	Asbesto Comprimido, 1/8" de espesor, Durabla o equivalente.	
PERNOS	Acero de Aleación, espárragos A193 Gr. B7, tuercas pesadas hexagonales A194 Gr. 2H	
CONEXIONES DE DESVIACIÓN	Acoples a rosca 3000# soldados a camisa.	

Fuente: PDVSA, 2009-2.



Apéndice FF. Especificación de la línea de azufre fundido (Cont.)

TUBERIAS DE DESVIACIÓN	Tubería S.S. sin costura, Templada A269 Gr. TP. 304, pared 0,035".										
ACCESORIOS DE TUBERIAS DE DESVIACIÓN	316 S.S. Tipo Flareless, Hoke Gyrolok o equivalente.										
VÁLVULAS (NOTAS 3 y 6)	Clase 150 RF, A216, Gr. WCB, guarnición 316 S.S., Completamente enchaquetado con conexiones de vapor dimensionadas como se indica en tabla anexa.										
(Nota 2)	1" a 6"	Tapón, no lubricada, asiento de metal, oper. por palanca, Stockman WA-71 Tipo J									
	8" a 16"	Igual que lo arriba excepto operada por engranajes									
	1" a 6"	Bola, entrada a tope Asientos reforzados TFE, palanca, Hills-McCanna F-151-S6									
	1" a 16"	Retención, Deslizante, Powel 32050F									
JUNTAS	Sin Mantenimiento Con Mantenimiento										
	1" y mayores	Soldada a tope 1" y mayores Bridas									
CONEXIONES (NOTA 2)	DERIVACIONES	Ver Anexo D									
	VENTEO Y DRENAJE	3/4" a 1-1/2" 3000# conexión de enchufe soldado con válvula de compuerta 3/4" a 1-1/2" enchufe soldado hembra x terminal roscado hembra, Vogt ST-2801									
	INSTRUMENTO										
	Presión	3/4" 3000# conexión de enchufe soldado con válvula de compuerta 3/4" de enchufe soldado x terminal roscado hembra, Vogt ST-2801									
	Flujo	1/2" conexión con rosca normal de tubo (NPT) con válvula de compuerta 1/2" enchufe soldado hembra x terminal roscado hembra, SC Vogt SW x SC									
TSW12111	Temperatura	1" Rosca Normal de Tubo (NPT)									
TUBERÍAS CON CAMISA SE DIMENSIONARÁN DE ACUERDO A LO SIGUIENTE:											
Tamaño Tuberías de Núcleos	1"	1-1/2"	2"	3"	4"	6"	8"	10"	12"	14"	16"
Tamaño Tuberías con camisa	2"	2-1/2"	3"	4"	6"	8"	10"	12"	14"	16"	20"
Tamaño de conex. de válvula de vapor y desv.	3/4"	3/4"	3/4"	3/4"	3/4"	1"	1"	1"	1"	1-1/2"	1-1/2"
Tamaño de D.E. de tubería de desviación	7/8"	7/8"	7/8"	7/8"	7/8"	1"	1"	1"	1"	1-1/2"	1-1/2"
NOTAS											
1. No se requiere soldadura de sello para los servicios comprendidos dentro de esta especificación.											
2. Las empaquetaduras del vástago de válvulas de compuerta y tapón deben ser adecuada para azufre fundido.											
3. Todas las válvulas deben tener un rótulo que diga "Servicio de Azufre Fundido".											
4. Los codos y tes deben ser para ensamblaje dividido.											
5. Todas las tuberías de núcleos deben ser probadas y apretadas asegurándose de la no existencia de filtraciones, antes de sellar definitivamente la camisa.											
6. Las válvulas deben ser del tamaño de la tubería de núcleos con bridas del tamaño de la camisa.											
7. El fabricante del sistema de camisas debe ser "Control Southeast" o un fabricante similar aprobado por PDVSA.											

Fuente: PDVSA, 2009-2.



Apéndice GG. Especificación de la línea de vapor sobrecalentado

ESPECIFICACIÓN DE LÍNEA AA3		
CLASE 150 RF – ACERO AL CARBONO		
SERVICIO (NOTA 5)	Ver Índice de Servicio	
LÍMITES DE PRESIÓN/TEMPERATURA	1373 KPa (157 psi) a 204 °C (399 °F) 654 KPa (95 psi) a 399 °C (750 °F)	
CORROSIÓN PERMITIDA	1,587 mm (0,0625")	
TUBERÍA	1/2" a 2"	Sch. 80 Extremo plano A106 Gr.B, sin costura
	3" a 6"	Sch. 40 Extremo biselado A53 Gr.B, sin costura
	8" a 24"	Sch. 20 Extremo biselado A53 Gr.B, sin costura
NIPLES	1/2" a 2"	Sch. 80, A106 Gr.B, sin costura
BRIDAS (NOTA 1)	Clase 150 RF, A105, Acabado 125–200 AARH	
	1/2" a 2"	Enchufe Soldado (maquinado internamente para igualar el D.I. del tubo)
	3" a 8"	Cuello Soldado (maquinado internamente para igualar el D.I. del tubo)
	10" a 24"	De deslizamiento
BRIDAS DE ORIFICIOS	Clase 300 RF, A105, Acabado 125 – 200 AARH	
	1–1/2" a 12"	Cuello Soldado (Maquinado internamente para igualar el D.I. del tubo)
	14" a 24"	(Nota 2)
ACCESORIOS	A105	
	1/2" a 2"	Enchufe Soldado 3000#
	A234 Gr. WPB	
	3" a 24"	Sin costura o soldada a tope (Sch. para calzar el tubo)
EMPAQUETADURAS	Devanadas en espiral, 304 SS, rellenas con asbesto, Flexitallic CG o equivalente	
PERNOS	Acero de Aleación, espárragos A193 Gr. B7; tuercas pesadas hexagonales A194 Gr. 2H	
VÁLVULAS		
Tamaño Pequeño (NOTA 4)	Clase 800, Extremos de Enchufe Soldado (SW), Guarnición Cr.13, Asientos Duros	
	1/2" a 2"	Compuerta (cuña sólida) Vogt SW 12111
	1/2" a 2"	De Globo (disco suelto) Vogt SW 12141

Fuente: PDVSA, 2009-2.



Apéndice GG. Especificación de la línea de vapor sobrecalentado (Cont.)

Tamaño Grande	1/2" a 2"	Retención (bola) Edwards 832Y
	Clase 150 RF Bridadas, A216 Gr. WCB, guarnición Cr.13, acabado de brida 125-200 AARH, asientos duros en compuerta y globo	
	3" a 12"	Compuerta (cuña sólida) Powell 1503N
	14" a 36"	Compuerta operada por volante o engranaje (cuña sólida) Powell 1503
	3" a 12"	Globo (disco suelto) Crane 143XU
(Nota 3)	3" a 36"	Retención (pastilla) (asiento de metal) Mission Duo – Check II 15SPF
	3" a 8"	Mariposa (de pastilla). Asiento TFE, disco 316, eje a prueba de fuego 17-4 PH, palanca posicionadora. Posi Seal Phoenix III
(Nota 3)	10" a 36"	Mariposa (de orejas). Asiento TFE, disco 316, eje a prueba de fuego 17-4 PH, operada con engranaje. Posi Seal Phoenix III
JUNTAS	Sin Mantenimiento	Con Mantenimiento
	1/2" a 2"	Enchufe soldado
	3" y mayores	Soldadura a tope 1/2" y más Bridas
CONEXIONES (NOTA 5)	DERIVACIONES	Ver Anexo D
	VENTEO Y DRENAJE	3/4" a 1-1/2" 3000# conexión de enchufe soldado con válvula de compuerta 3/4" a 1-1/2" enchufe soldado hembra x terminal roscado hembra, Vogt ST-2801
	INSTRUMENTO	
	Presión	3/4" 3000# conexión de enchufe soldado con válvula de compuerta 3/4" de enchufe soldado x terminal roscado hembra, Vogt ST-2801
	Flujo	1/2" conexión con rosca normal de tubo (NPT) con válvula de compuerta 1/2" enchufe soldado hembra x terminal roscado hembra, Vogt 12111
	Temperatura	1" Rosca Normal de Tubo (NPT)
NOTAS:		
1. Se podrán usar bridas de desplazamiento en lugar de cuello soldado cuando se requiera por motivos de espacio. La temperatura máxima para las bridas de desplazamiento es de 204°C. Cuando la temperatura exceda de 204°C se usarán bridas de cuello soldado en lugar de deslizamiento.		
2. Usar bridas de cuello soldado Clase 150 RF, A105 en tomas en tubos.		
3. Las válvulas de mariposa de alto rendimiento serán usadas como válvulas de estrangulamiento en servicio de vapor especialmente mayores de 12". La temperatura máxima para válvulas de mariposa es 232°C.		
4. Cuando se requiera válvulas de bloque bridadas de 2" o menores, para conexiones de recipientes o equipos, éstas deberán ser válvulas de compuerta Clase 150, Vogt 353 con acabado de bridas 125-200 AARH.		
5. Las tomas de instrumentos de presión, flujo, drenajes y venteos deberán ser soldados o sellados con soldadura hasta la rosca de entrada de la primera válvula de bloque.		

Fuente: PDVSA, 2009-2.



Apéndice HH. Estimación de costos del proyecto

DESCRIPCIÓN	FACTOR DE AJUSTE	LABOR (USD)	MATERIAL (USD)	Factor de labor (%)	Factor de material (%)	COSTO DE LOS EQUIPOS (USD)	FACTOR DFC PARA EQUIPO	TOTAL	FACTOR SOBRE COSTO TOTAL DE EQUIPOS
Silo de almacenamiento (Azufre sólido)		7.798,86	23.396,57	25%	75%	12.998,10	2,4	31.195,43	
Cinta transportadora		192.490,37	577.471,11	25%	75%	226.459,26	3,4	769.961,48	
Tanque de fundición		18.158,02	54.474,06	25%	75%	30.263,36	2,4	72.632,08	
Bomba de Azufre		20.136,91	60.410,72	25%	75%	23.690,48	3,4	80.547,63	
Filtro de Azufre		13.517,59	40.552,78	25%	75%	22.529,32	2,4	54.070,38	
Tanque de almacenamiento (Azufre fundido)		149.586,72	448.760,15	25%	75%	249.311,20	2,4	598.346,87	
						565.251,72			
COSTOS DIRECTOS (DFC)		401.688,47	1.205.065,40					1.606.753,87	2,8
Facilidades temporales de construcción									
Servicios de construcción y suministros									
Personal de Campo / Asistencia / Gastos									
Nómina / Beneficios / Seguros									
Equipos y herramientas de construcción									
Gastos Internacionales									
COSTOS INDIRECTOS	115%							461.941,74	
TOTAL DE COSTOS EN CAMPO								2.068.695,60	3,7
Gestión de proyectos									
Control de proyectos y estimados									
Adquisiciones del proyecto									
Manejo de la construcción del proyecto									
Diseño e Ingeniería									
Gastos administrativos									
COSTOS ADMINISTRATIVOS	30%							482.026,16	
COSTOS TOTALES DE CAMPO Y ADM.								2.550.721,76	4,5
Costos de propiedad									
Costos de arranque	3%							48.202,62	
Escalamiento									
Otros costos									
Contingencia	15%							389.838,66	
Honorarios									
OTROS COSTOS DEL PROYECTO								438.041,27	
COSTOS TOTALES DEL PROYECTO								2.988.763,04	5,3