

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ciencias y Humanidades

Departamento de Ingeniería Química



# **Diseño y factibilidad económica de una fábrica de sulfatos.**

Michelle Marie Matheu Aycinena

Guatemala,

2004



**Diseño y factibilidad económica  
de una fábrica de sulfatos.**

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ciencias y Humanidades

Departamento de Ingeniería Química



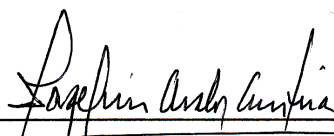
## **Diseño y factibilidad económica de una fábrica de sulfatos.**

Trabajo de investigación presentado por Michelle Marie Matheu Aycinena, para optar por el grado académico de Licenciada en Ingeniería Química.

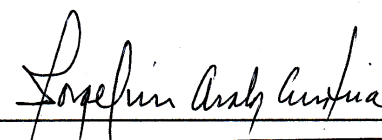
Guatemala,

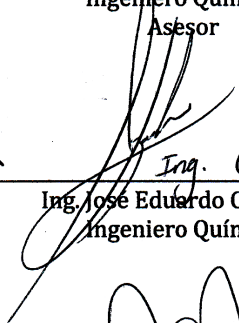
2004

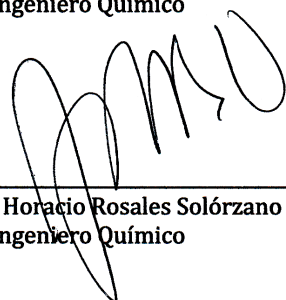
Vo.Bo.

(f)   
\_\_\_\_\_  
Ing. Jorge Luis Ávalos  
Asesor

Tribunal examinador:

(f)   
\_\_\_\_\_  
Ing. Jorge Luis Ávalos  
Ingeniero Químico  
Asesor

(f) X   
\_\_\_\_\_  
Ing. Gamaliel Zambrano  
Ing. José Eduardo Calderón  
Ingeniero Químico

(f)   
\_\_\_\_\_  
Ing. Jaime Horacio Rosales Solórzano  
Ingeniero Químico

Fecha de aprobación: Guatemala, 25 de enero 2005



## **PREFACIO**

Este trabajo no hubiera sido posible sin el apoyo incondicional de Mónica y Estuardo, mis padres, y Luisfer Cabarrús, quienes hicieron posible la finalización de esta investigación.

# CONTENIDO

	Página
PREFACIO .....	v
LISTA DE TABLAS .....	vii
LISTA DE FIGURAS .....	ix
RESUMEN .....	x

## Capítulos

I. INTRODUCCIÓN .....	1
II. ANTECEDENTES .....	2
III. JUSTIFICACIÓN .....	13
IV. OBJETIVOS.....	14
V. PROBLEMA A RESOLVER.....	15
VI. METODOLOGÍA .....	16
VII. RESULTADOS.....	17
VIII. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	24
IX. CONCLUSIONES .....	30
X. RECOMENDACIONES.....	31
XI. BIBLIOGRAFÍA .....	32
XII. APÉNDICE .....	33

## LISTA DE TABLAS

	Página
1. Densidad relativa y graduación Baumé de las soluciones de Ácido Sulfúrico	5
2. Presión total de vapor de las soluciones de Ácido Sulfúrico a 100° C. ....	6
3. Condiciones de proceso .....	18
4. Especificaciones de equipo y dimensiones.....	19
5. Especificaciones del reactor .....	20
6. Flujo de caja .....	22
7. Valor Actual Neto y Tasa Interna de Retorno.....	23
8. Tiempo de recuperación de la inversión.....	23
9. Punto de equilibrio .....	23
10. Proporciones alimentadas de agua y mineral de hierro. ....	33
11. Análisis de composición del producto .....	34
12. Análisis de mineral de Hierro de Jocotán, Chiquimula .....	35
13. Análisis de Sulfato Férrico .....	35
14. Resumen de balance de masa.....	37
15. Estimación de costos de los equipos .....	40
16. Inversión inicial .....	41
17. Costos y gastos fijos de fabricación .....	41
18. Costos variables de fabricación .....	42
19. Cálculo de costo unitario .....	42
20. Cálculo de precio de venta .....	43
21. Cálculo de amortizaciones sobre el equipo adquirido y gastos diferidos....	43

22. Cálculo de pagos anuales al banco .....	43
23. Flujo de caja y análisis de rentabilidad .....	44

## LISTA DE FIGURAS

	Página
1. Diagrama de flujo del proceso.....	18
2. Dimensiones del reactor.....	19
3. Distribución de la planta.....	21

## RESUMEN

El objetivo esta investigación es diseñar y evaluar la rentabilidad de una planta para la fabricación de Sulfato Férrico anhídrido y granular. El Sulfato Férrico es una sal que se utiliza, principalmente, como coagulante para el tratamiento de agua. Su forma más común de prepararlo es por medio de la reacción entre el mineral de hierro Férrico y Ácido Sulfúrico. Para el diseño del proceso, se investigó todos los métodos utilizados registrados en patentes y se desarrolló un proceso nuevo que fuera simple y que involucrara los menores costos de operación. El diseño del proceso de fabricación del Sulfato Férrico y anhídrido consta principalmente de un reactor en el cual se alimenta mineral de hierro pulverizado, Ácido Sulfúrico concentrado al 98% y agua y se obtiene un producto sólido, seco y granular con un 60% (m/m) de Sulfato Férrico.

Luego de haber desarrollado la invención, se estimó la inversión inicial necesaria para la instalación de la planta, se estimó el precio de venta y se calculó la tasa interna de retorno, el punto de equilibrio y el tiempo de recuperación de la inversión. Los resultados fueron favorables y se concluyó que el proyecto sí es rentable. Entre los resultados obtenidos se puede mencionar un valor de tasa interna de retorno del 36% y se estimó un tiempo de recuperación de 1.50 años. El punto de equilibrio se encuentra en el primer año y se obtuvo un valor de beneficio/costo de 5.22 al final de los 5 años.

# I. INTRODUCCIÓN

El Sulfato Férrico es una sal que se utiliza como coagulante para el tratamiento de agua. Se prepara a partir de Óxido Férrico proveniente del mineral de hierro y de Ácido Sulfúrico. La demanda y costo de este producto depende, principalmente, de su proceso de fabricación que establece sus características finales como producto terminado.

La demanda de este producto tiende a estar en aumento debido a las restricciones y especificaciones en el tratamiento de agua. Cada vez es más importante que las aguas negras, industriales, de desecho, entre otras, cumplan con las especificaciones dadas por las instituciones encargadas de velar por el desarrollo sostenible de las sociedades.

El objetivo de este trabajo de investigación es presentar todas las herramientas utilizadas para el diseño del proceso, dimensionamiento del equipo, selección de materiales de construcción para favorecer la rentabilidad del proyecto.

El tamaño de la planta diseñada en este proyecto tiene una capacidad de producción de 1.8 Tm/h (2 ton/h), y un ciclo de operación de 8 h diarias y 20 días al mes. El enfoque del diseño de esta planta es la disminución de costos de operación por medio del ahorro de energía y aprovechamiento de los calores de dilución y reacción.

El análisis económico se realizará utilizando los criterios de Valor Actual Neto, Tasa Interna de Retorno, Punto de Equilibrio y Tiempo de Recuperación de Inversión.

## II. ANTECEDENTES

### A. Sulfato Férrico

**1. Características del Sulfato Férrico.** El Sulfato Férrico ( $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ ), es una sal que tiene su atención en el proceso de coagulación para el tratamiento de agua. Esta aplicación se basa en la capacidad que tiene de formar coágulos en una solución acuosa en un amplio intervalo de valores de pH. Entre otras de sus aplicaciones se conoce también la grabación de aluminio, limpieza de acero inoxidable y cobre, y como mordiente en el teñido y estampado de textiles. En términos generales, la preparación de sulfato férrico se logra a partir de de la oxidación de sulfato ferroso; y por la acción del Ácido Sulfúrico sobre el Óxido Férrico. Se prefiere utilizar la segunda debido a que el proceso es más económico y simple (Kirk, 1961).

El Sulfato Férrico en sí no es un producto nuevo. Lo que ha cambiado son las técnicas de fabricación y las proporciones y naturaleza de sus materias primas (Evrill, 1989).

**2. Propiedades químicas del Sulfato Férrico.** A continuación se presenta una lista con las propiedades del sulfato férrico. Las cuales serán de utilidad en el diseño.

- Masa Molecular: 399.9
- Densidad Relativa: 3.097<sup>1</sup>.
- Solubilidad: lenta en agua a temperatura ambiente. Su solubilidad en agua aumenta a medida que aumenta el número de moléculas de agua que contiene el Sulfato Férrico (Wilder, 1992).
- Forma hidratos con 3,6,7,9,10,12 moléculas de agua. (Kirk, 1961).
- Su corrosividad aumenta con la temperatura y con la cantidad de cloratos que contenga (Wilder, 1992).
- Color: gris cuando su estado es sólido, y rojizo cuando se encuentra en solución acuosa (Wilder, 1992).

---

<sup>1</sup> Tomada a 20° C y referida al agua a 4° C

**3. Especificaciones del Sulfato Férrico como producto terminado.** El Sulfato Férrico que se vende en forma de gránulos debe ser seco y de tamaño particular uniforme. Generalmente, el 95% del producto debe pasar a través de una malla No. 4 <sup>2</sup>(USA) y el 100% debe pasar a través de una malla No. 3 (Wilder, 1992).

Las especificaciones químicas del Sulfato Férrico se mencionan a continuación:

- Contenido de Hierro Férrico: el porcentaje mínimo de contenido de hierro férrico soluble en agua es 18% en el Sulfato Férrico granular.
- Contenido de Hierro Ferroso: menor a 3%.
- Insolubles: menor a 6.5%
- Ácido libre: el porcentaje máximo permitido de Ácido Sulfúrico es 4.5%
- Contenido de Cloratos: menor a 10 ppm (Wilder, 1992).
- El Sulfato Férrico granular se empaca en bolsas herméticas y de papel multilaminado de 23 a 25 Kg. También se puede empacar en toneles herméticos de polietileno de alta densidad con capacidades alrededor de 160 Kg (Wilder, 1992).

**4. Análisis de mercado para el Sulfato Férrico en Guatemala y Latino América.** Las demandas de Sulfato Férrico han incrementado desde que las especificaciones de pureza y calidad de agua potable han incrementado. Esta demanda no se había podido satisfacer debido a que los métodos de fabricación del Sulfato Férrico hacían que el producto tuviera un precio de venta sumamente elevado. Actualmente, las nuevas técnicas de fabricación permiten que los costos de producción disminuyan y la demanda sea cubierta (Wilson, 1939).

## **B. Descripción y propiedades de la materia prima**

**1. Características del Óxido Férrico.** El Óxido Férrico ( $Fe_2O_3$ ) es el principal mineral de hierro y se encuentra en forma de hematitas. Existen diferentes fuentes de Óxido Férrico. Se obtiene como mineral de hierro, el cual se consigue comercialmente y contiene un 98% en peso de Óxido de Hierro (Evrill, 1989).

---

<sup>2</sup> Escala de tamices basada en una abertura de 7.4 E-5 m (0.0029 in), que es la abertura del tamiz estándar de 200 mallas y 5.3 E-5 m (0.0021 m) de diámetro de alambre, tal como ha sido adoptada por el Nacional Bureau of Standard (McCabe, 2001).

Los minerales de hierro se clasifican y agrupan en óxidos, carbonatos o compuestos de carbono, sulfuros y silicatos. Dentro de los óxidos están la magnetita, que es una mezcla de Óxido Férrico-ferroso, la hematita que se compone principalmente de Óxido Férrico, Ilmenita que es un óxido hierro-titanio y limonita que es óxido acuoso de hierro. Entre los carbonatos se encuentra la siderita que es el carbonato de hierro. Los minerales de hierro compuestos principalmente de óxidos son la fuente más importante de hierro ([www.asimet.cl](http://www.asimet.cl)).

**2. Propiedades del Oxido Férrico.** Entre las propiedades del Oxido Férrico se pueden mencionar:

- Masa molecular: 159.7
- Forma: cristales hexagonales o trigonales de color rojo o negro
- Densidad relativa: 5.12-5.24<sup>3</sup>
- Índice de refracción: 3.042
- Descomposición a 1560° C

**3. Disponibilidad de mineral de hierro en Guatemala.** La producción de mineral de hierro en Guatemala es muy pequeña comparada con otros productores latinoamericanos. Principalmente en la Sierra Central del país y que coincide con la falla del Polochic, Izabal y Alta Verapaz. Entre los productores más grandes de este mineral en Latinoamérica se pueden mencionar: Brasil con 170,460,012.65 t (187,900,000 ton) de mineral de hierro, Venezuela con una producción de 16,655,004.66 t (18,359,000 ton), Chile con 7,926,980.26 t (8,738,000 ton) y por último México con 7,076,040.97 t (7,800,000 ton) de mineral de hierro. Guatemala produce una cantidad mínima comparada con estos países y corresponde a 2,721.55 t (3,000 toneladas). Sin embargo, para la capacidad de la planta que se desea diseñar, la disponibilidad local de materia prima es suficiente. Los productores de mineral de hierro en Guatemala están pasando por una crisis debido a que su principal consumista, Cementos Progreso, está obteniendo el hierro de otra fuente, esto hace que el precio baje y que la oferta aumente ([www.mmsd-la.org](http://www.mmsd-la.org)).

---

<sup>3</sup> Tomada a 20° C y referida al agua a 4° C

**4. Características del Ácido Sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>).** El Ácido Sulfúrico se ha considerado siempre como un compuesto afín a la química inorgánica. Entre los usos más importantes se mencionan la industria del rayón, la industria de los pigmentos de titanio y en la industria del petróleo. El consumo de Ácido Sulfúrico en Estados Unidos ha incrementado enormemente durante los años. El Ácido Sulfúrico se utiliza generalmente en solución y sus propiedades cambian según el grado de concentración de la solución (Kirk, 1961).

**5. Propiedades del Ácido Sulfúrico.** Las propiedades más importantes del Ácido Sulfúrico se listan a continuación:

- Masa molecular: 98.082
- Líquido oleoso, corrosivo, incoloro
- Densidad Relativa 1.8357<sup>4</sup>
- Punto ebullición 270° C

Su densidad suele expresarse en grados Baumé, que se relacionan con la densidad decimal a partir de la fórmula  $Be = 145 - (145/\text{densidad})$ . Los valores se muestran en la siguiente tabla (Kirk, 1961).

**Tabla 1. Densidad relativa y graduación Baumé de las soluciones de Ácido Sulfúrico (Kirk, 1961).**

°Bé	Densidad Relativa <sup>5</sup>	% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	°Bé	Densidad Relativa	% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
50	1.5263	62.18	58	1.6667	74.36
51	1.5426	63.66	59	1.6860	75.99
52	1.5591	65.13	60	1.7059	77.67
53	1.5761	66.63	61	1.7262	79.43
54	1.5934	68.13	62	1.7470	81.30
55	1.6111	69.65	63	1.7683	83.34
56	1.6292	71.17	64	1.7901	85.66
57	1.6477	72.75	65	1.8125	88.65
			66	1.8354	93.13

<sup>4</sup> Tomada a 20° C y referida al agua a 4° C

<sup>5</sup> todas las medidas de densidad relativa de esta tabla están tomadas a 20° C y referida al agua a 4° C

La presión de vapor varía según la concentración en solución acuosa. En el sistema ácido-agua, hay una mezcla de ebullición constante a 98.3% de ácido. A continuación se muestra una tabla con los valores (Kirk, 1961).

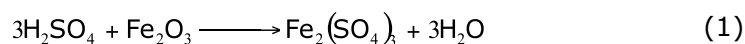
**Tabla 2. Presión total de vapor de las soluciones de Ácido Sulfúrico a 100° C. (Kirk, 1961)**

<b>% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub></b>	95	90	85	80	75	70	65	60	50
<b>Mm Hg</b>	.0237	1.49	1.39	13.9	32	67	114	178	326

El calor específico del Ácido Sulfúrico disminuye a medida que aumenta la fracción en peso (Kirk, 1961).

## C. Técnicas utilizadas en el proceso de fabricación del sulfato Férrico

### 1. Reacción principal dentro del reactor



**2. Proceso de manufactura del Sulfato Férrico con énfasis en el ahorro de consumo energético<sup>6</sup>.** Esta patente trata sobre un proceso continuo de producción de Sulfato Férrico anhidro y granular. Este tipo de proceso reduce el tiempo de fabricación y los costos aún más que en un proceso tipo lote. Este nuevo método disminuye los costos de fabricación debido a la eliminación de los períodos de curación que involucraban consumos energéticos muy altos (Satterwhite et al., 1974).

Inicialmente se mezcla el Óxido Férrico con una cantidad suficiente de agua (manteniendo la cantidad de sólidos en un 18 a 35%) para formar un "lodo" de Óxido Férrico. Luego se agrega una fracción del Ácido Sulfúrico convirtiendo el lodo en uno conformado principalmente de Sulfato Férrico. La cantidad de agua se debe mantener como al inicio para evitar que se forme una masa viscosa que luego se tenga que curar para completar la reacción. Al agregar el Ácido Sulfúrico restante la temperatura en el sistema aumenta lo suficiente para completar la reacción y evaporar el agua (Satterwhite *et al.*, 1974).

<sup>6</sup> Energy Conserving Process for Manufacturing Ferric Sulfate (patente 3954953)

La conversión en esta reacción es generalmente del 96%. Durante la fase acuosa de la reacción, el contenido de Óxido Férrico no debe de exceder los límites, siendo el inferior 18% y el superior 25%. Si se sobrepasa el límite superior, la viscosidad del lodo aumentará a tal punto que no se puede movilizar ni agitar con facilidad y la reacción tendrá una menor conversión. Por lo contrario, si se sobrepasa el límite inferior, se necesitará demasiada energía y tiempo para evaporar todo el agua y lograr obtener un producto seco. La mezcla de reacción se prepara in-situ. Se alimenta el Óxido Férrico sólido, el agua y el Ácido Sulfúrico de forma continua. (Satterwhite *et al.*, 1974).

El Óxido Férrico se alimenta generalmente como mineral de hierro. Éste no es Óxido Férrico puro, y generalmente viene acompañado de Óxido Ferroso, Magnetita, y otras formas de óxidos de hierro. Cantidades menores al 5% del sílica y trazas de Óxidos de Cobre, Plomo, Zinc y otras impurezas pueden estar presentes en la materia prima. El porcentaje de Óxido Férrico en la materia prima es generalmente de 70 a 90%. Es importante mencionar que para este diseño se obtienen prácticamente los mismos resultados al alimentar el reactor con polvos u óxidos férricos gruesos (Satterwhite *et al.*, 1974).

La composición del mineral de hierro dependerá del sitio de donde se extrae y es necesario realizar un análisis previo para decidir la técnica de tratamiento de la materia prima (Satterwhite *et al.*, 1974).

La concentración deseada de Ácido Sulfúrico es alrededor de 50% en peso. Mientras menor sea la concentración de Ácido Sulfúrico en la reacción, mayor energía externa es necesaria para la llevar a cabo la reacción. Una concentración muy alta de Ácido Sulfúrico genera más calor del necesario. Se recomienda alimentar el ácido lo más concentrado posible (Satterwhite *et al.*, 1974).

Generalmente se adiciona desde el 50 hasta el 70% de ácido durante la fase acuosa. Al final de esta etapa, del 55 al 65% de la reacción estará completa y se procede a la fase de aglomeración. Es necesario realizar pruebas para saber cuándo se ha llegado a esta conversión (Satterwhite *et al.*, 1974).

El lodo caliente contenido de Sulfato Férrico se descarga en un granulador rotatorio. Para mejores resultados en esta etapa de granulación, se dispersa el lodo y el restante de ácido sobre un lecho de gránulos previamente fabricados de Sulfato Férrico. En esta etapa se completa la reacción en su mayoría y se seca parcialmente los gránulos del producto. Por último se introduce en un secador donde el agua restante se evapora espontáneamente y se completa la reacción. Una forma de realizar esta última etapa es introduciendo los gases de combustión

directamente en el secador. La temperatura en esta última etapa debe estar entre 140 y 175° C . La temperatura de los gases de combustión no debe exceder los 180° C para obtener un producto soluble en agua. La dureza del producto estará en un rango entre 7 y 12 Kg en la escala de STOKES (Satterwhite et al., 1974).

Al final del proceso, la conversión de la reacción alcanza un 96% y los gránulos tienen un tamaño aproximado en un rango de 6 a 16 mesh. Los gránulos que sobrepasan ambos límites especificados son apartados y retornados al granulador. Una razón de 2 a 4 partes del producto recircula al granulador (Satterwhite et al., 1974).

**3. Método de preparación de Sulfato Férrico normal<sup>7</sup>.** Esta patente se refiere a la invención de Sulfato Férrico Anhidro, granular y soluble en agua. El hecho de producir Sulfato Férrico en vez de producirlo en forma de solución y luego cristalizar, disminuye costos y tiempo significativamente (Wilson, 1939).

El proceso consiste en alimentar Ácido Sulfúrico a un 85% y Pirita (se puede utilizar otra fuente de Óxido Férrico) a un molino. Con esta alimentación sola se consigue un aumento de temperatura hasta 140° C. La agitación dentro del tanque es indispensable para mantener una mezcla semi-fluida y evitar la sedimentación de Óxido Férrico que aún no ha reaccionado. Luego se alimenta la mezcla al reactor que mientras aumenta la temperatura, se termina de completar la reacción. Una vez completa la reacción, se habrá formado una masa sólida de Sulfato Férrico, la cual se muele nuevamente y se le adiciona agua, solución diluida de Ácido Sulfúrico y solución suficientemente diluida del mismo producto. Se obtiene un producto granular que luego se calcina para que quede libre de hidratos y Ácido Sulfúrico (Wilson, 1939).

Entre las condiciones de operación se menciona que la temperatura debe de exceder los 140° C y la concentración del Ácido Sulfúrico debe de mantenerse entre 85% y 95% peso. Mejores resultados se obtienen al alimentar la fuente de Óxido Férrico finamente pulverizado (mesh 200). Esto es para la etapa de la molienda en donde se forma el lodo que luego se introduce al reactor. Al inicio se mezcla la pirita con 50 a 70% de la solución de ácido y luego al alimentar el reactor, se agrega el resto del ácido (Wilson, 1939).

---

<sup>7</sup> Method of Preparing Normal Ferric Sulphate (patente 2173144)

Es importante no exceder los límites de la temperatura (alrededor de 250° C) debido a que se puede volatilizar componentes. Para evitar esto se elimina el exceso de calor con una chaqueta (Wilson, 1939).

Al finalizar la reacción se muele en un mezclador rotatorio o en un tornillo sin fin. Se agrega agua para permitir que se aglomere el Sulfato Férrico. La cantidad de agua agregada depende del tamaño requerido de los gránulos (10 al 12% de la cantidad de Sulfato Férrico). El agua agregada también evitará que aumente la temperatura demasiado. Para obtener un producto de mejor calidad, se calcina a 400°-450° C. La calcinación permite que el Ácido Sulfúrico que quedó en los gránulos reacciones con el Óxido Férrico residual y se obtenga un producto más puro (Wilson, 1939).

**4. Proceso para preparar Sulfato Férrico<sup>8</sup>.** El objetivo de esta invención es producir Sulfato Férrico soluble en agua, de la mejor calidad al mínimo costo. Otro objetivo es la obtención de Óxido de Hierro, que se utiliza como materia prima, proviene de los desechos de hornos que operan con sulfatos de hierro (Plummer, 1941).

Durante el proceso, la energía utilizada para llevar a cabo la reacción proviene del calor generado por la misma reacción (Plummer, 1941).

La preparación de la mezcla se lleva a cabo en un mezclador de tipo superfosfato y se agita un tiempo de 10 minutos aproximadamente. El mezclador se alimenta con Ácido Sulfúrico a 63 Bé y el Óxido de Hierro y suficiente agua. El agua que se le agrega al Óxido de Hierro debe ser tal que la concentración de ácido no baje de 60 Bé. Se prefiere que la concentración se mantenga en 66 Bé. La energía de activación de la reacción se consigue con el calor expedido por la reacción se comienza a dar en la mezcla utilizando estas concentraciones de Ácido Sulfúrico (T= 176.66° C). Luego, esta mezcla se traslada a un tanque isotérmico donde la temperatura continuará subiendo (Plummer, 1941).

Las cantidades alimentadas de materia prima dependerán de la composición del polvo que proporciona el Óxido Férrico. Generalmente, se alimenta 342.91 Kg (756 lb) Ácido Sulfúrico a 66 Bé, 272.15 Kg (600 lb) de polvo de Óxido Férrico y 68 Kg (150 lb) de agua. Luego, cuando la temperatura aumenta lo suficiente, se traslada el lodo a un tanque de concreto o un silo térmicamente aislado donde se completa la reacción (Plummer, 1941).

---

<sup>8</sup> Process of Making Ferric Sulphate (patente 225332)

**5. Proceso para la fabricación de Sulfato Férrico líquido<sup>9</sup>.** Esta patente consiste en producir una solución de Sulfato Férrico con un 10% de hierro trivalente. El proceso consiste en la reacción de Ácido Sulfúrico concentrado, Óxido de Hierro y agua dentro de un reactor a una temperatura entre 130-150° C y 206 a 275 kPa (Evrill, 1989).

El Sulfato Férrico es un compuesto que se utiliza como coagulante en el tratamiento del agua. La materia prima principal es el mineral de hierro de donde se extrae el Óxido de Hierro. El costo de fabricación del Sulfato Férrico dependerá en la calidad de la materia prima utilizada y de su estado final (líquido o sólido) (Evrill, 1989).

Originalmente se fabricaba Sulfato Férrico sólido, el cual se producía a partir de polvos suspendidos en gases de chimenea. El principal problema con este producto es su alta higroscopía y los gránulos obtenidos al final no tienen un tamaño uniforme. Otro problema es que el Sulfato Férrico sólido acarrea con impurezas provenientes del mineral de hierro utilizado y al utilizar éste como floculante, las impurezas precipitan y se forma un lodo que es más difícil de remover. Los compradores del Sulfato Férrico sólido pagan por un material inútil que les significa un costo (Evrill, 1989).

Esta invención trata de la reacción entre mineral de hierro (98% de Óxido de Hierro), Ácido Sulfúrico al 93% y agua bajo condiciones superatmosféricas (140° C y 206 kPa). El ciclo de operación es de 4 a 6 h. Este proceso necesita de energía externa (generalmente en forma de vapor) para alcanzar la energía de activación, luego ya no es necesaria debido a que la reacción es exotérmica. La temperatura aumenta 5° C cada 15 minutos. La temperatura puede variar entre 135 y 150° C pero es preferible mantenerlo en 140° C. Si la temperatura se sale de este rango se pueden dar otras reacciones y obtener como producto un Sulfato Férrico pentahidratado. El hierro mineral puede ser adquirido comercialmente por la empresa DENSITECH (Evrill, 1989).

La materia prima se debe alimentar al reactor en proporciones de 17 a 27% (22) de Óxido Férrico, 31 a 41% (36) de Ácido Sulfúrico y 37 a 47% (42) de H<sub>2</sub>O. Al finalizar la reacción, se libera la presión y se disminuye la temperatura a 75° C en un tiempo aproximado de 4 h. Es necesario disminuir la temperatura lo antes posible para evitar la hidratación del Sulfato Férrico. Antes de trasladar el producto al tanque de almacenamiento, es necesario filtrar la solución. El producto obtenido tendrá una concentración del 10 al 12% (Evrill, 1989).

---

<sup>9</sup> Process for Making Liquid Ferric Sulfate (patente 4814158).

## D. Tipos de molino utilizados dentro del reactor

**1. Molino de bolas.** Un molino de bolas consiste esencialmente de una coraza de forma cilíndrica o cónica sostenida en chumaceras para muñones huecos sobre los que giran. El molino se conserva lleno de bolas hasta la mitad. La velocidad a la que gira la carcasa debe ser tal que la cascada de las bolas y su acción de rodamiento tenga el máximo efecto en el material. La velocidad crítica del molino se conoce como la velocidad a la que las bolas de la capa más exterior justamente se cuelgan de la coraza y se puede calcular fácilmente utilizando una fórmula que relaciona su velocidad en revoluciones por minuto ( $N_c$ ) y el radio de la carcasa dado en pies ( $r$ ) (McCabe, 1991).

$$N_c = 54.2/r^{1/2} \quad (2)$$

Generalmente se operan los molinos de bolas a un 70-80% de su velocidad crítica. La acción demoledora del molino de bolas aumenta si se mantiene un fluido altamente viscoso dentro de la carcasa, es decir que contenga de 18 a 35% de agua. Como regla general, una mayor velocidad del molino origina mayor capacidad pero baja la eficiencia y produce mayor desgaste de las bolas (McCabe, 1991).

La descarga en el molino puede hacerse utilizando parrillas de descarga especiales que consisten en secciones ranuradas sujetadas a costillas dispuestas radialmente. Las ranuras se colocan a una distancia determinada para impedir atascamientos (McCabe, 1991).

La capacidad del molino dependerá principalmente de la carga de alimentación y del tamaño de partícula que se desea obtener y el tipo de bolas utilizadas. Las bolas varían de tamaño con el fin de reducir los espacios desaprovechados en el molino. El material de construcción de bolas influirá en el tamaño de partícula en la descarga (McCabe, 1991).

La carga de bolas debe hacerse de forma que estén a 2 a 4 cm del nivel del material a moler. El tamaño de éstas está entre un rango de 3 a 4 in de diámetro para una alimentación de  $\frac{3}{4}$  a  $\frac{3}{8}$  in de diámetro particular. En los molinos de bolas se obtienen productos de diámetros particulares tales que pasan a través de una malla No. 200 (McCabe, 1991).

La carcasa del molino puede ser cilíndrica o cónica. Los molinos cilíndricos proporcionan un menor consumo energético pero con el molino cónico se consiguen moliendas mas finas (McCabe, 1991).

**2. Molino de rodillos.** El molino de rodillos consiste en una carcasa cilíndrica y su medio demolidor consta de barras. A medida que el cilíndrico gira, las rodillos en el fondo del cilindro giran y desgastan las partículas grandes que se desean reducir de tamaño. Este tipo de molino concentra su atención en las partículas grandes que permanecen mayor tiempo en el fondo y se consigue una mejor molienda que en el molino de bolas. La descarga de este molino es más granular que en un molino de bolas y el diámetro particular de salida es hasta de 10 mesh (McCabe, 1991).

Para calcular el diámetro de los rodillos se utiliza el mismo criterio que en los molinos de bolas, al igual que para calcular la velocidad crítica de rotación (McCabe, 1991).

## **E. Materiales de construcción del equipo**

El Sulfato Férrico y el Ácido Sulfúrico son materiales altamente corrosivos y, por lo tanto, es necesario construir los equipos con un material que sea resistente a esta corrosión como los súper refractarios de carburo de silicio u otro tipo de concreto resistente. Una alternativa es construir el equipo de hierro dulce y hacerle un tipo de recubrimiento. Es importante, para fines de este proyecto, analizar la alternativa que sea más conveniente en cuanto a seguridad, calidad, eficiencia y sobre todo costos.

**1. Súper refractarios de Carburo de Silicio.** Los súper refractarios de Carburo de Silicio son materiales fabricados a partir de sus materias primas básicas: coque y arena sílica, y procesados a temperaturas que exceden los 2000° C. Existe una amplia variedad de super refractarios se caracterizan por las proporciones de materia prima y sus aplicaciones (Carborundum).

Entre sus características principales se puede mencionar que tienen un alto grado de refractabilidad. Su resistencia a altas temperaturas alcanza durante 5 horas sin contraerse a 1600° C. Tienen una resistencia excepcional a choques térmicos y una conductividad térmica 10 veces mayor que la de materiales de arcilla común. Es altamente resistente a la abrasión mecánica y tienen un bajo coeficiente de expansión. Los súper refractarios son de naturaleza ácida y por lo tanto, son resistentes a la mayoría de los ácidos y escorias o fundentes (Carborundum).

### **III. JUSTIFICACIÓN**

Se ha estudiado la posibilidad de fabricar Sulfato Férrico como un sustituto al Sulfato de Aluminio debido a que se estima que los costos de fabricación son menores. La disponibilidad de materia prima para el Sulfato Férrico es mayor y el costo de operación es menor que en el caso del Sulfato de Aluminio. Además, el Sulfato de Aluminio y el Sulfato Férrico tienen, en su mayoría, las mismas aplicaciones en la industria, se destaca su capacidad como coagulante en el tratamiento de agua. Esto último hace que el Sulfato Férrico sea un excelente producto sustituto para el Sulfato de Aluminio.

## **IV. OBJETIVOS**

### **A. Objetivo general**

Diseñar y hacer una factibilidad económica sobre una planta que consiste en un reactor rotatorio y continuo, seguido por un granulador, para la fabricación de Sulfato Férrico anhidro y granulado a partir de la reacción de Óxido Férrico y Ácido Sulfúrico.

### **B. Objetivos específicos**

1. Definir la cantidad que se desea producir y el ciclo de operación del equipo.
2. Evaluar las fuentes y disponibilidad de materia prima así como las propiedades de cada una.
3. Realizar un diseño preliminar de los equipos y un diagrama de flujo en forma cualitativa.
4. Calcular los balances de masa y energía y dimensionar el equipo.
5. Estudiar y determinar los materiales de construcción de los equipos.
6. Según los diseños preliminares, realizar la factibilidad económica.
7. Realizar el diseño final del equipo.

## **V. PROBLEMA A RESOLVER**

En una planta de Sales Ácidos y Solventes, se desea producir Sulfato Férrico granular y anhídrido. La fabricación de este compuesto es indispensable para la rentabilidad de la empresa. Actualmente, esta planta no cuenta con el equipo necesario para su fabricación. Estos equipos necesitan ser diseñados según los requerimientos del proceso y de las limitaciones de costos de la empresa. Sin un diseño apropiado, la construcción de la planta no sería posible y la empresa estaría en graves problemas económicos.

## **VI. METODOLOGÍA**

### **Fase 1: Diseño de la planta**

1. Investigar las diferentes fuentes de materia prima disponibles.
2. Realizar pruebas de laboratorio necesarias para determinar la eficiencia y velocidad de reacción, análisis de materia prima, así como otra información necesaria para el diseño del equipo y del proceso.
3. Realizar el diagrama de flujo preliminar del proceso.
4. Calcular los balances de masa y energía; y establecer las condiciones óptimas de operación.
5. Dimensionar el equipo.
6. Determinar el material de construcción del equipo.
7. Realizar el diagrama de flujo cuantitativo del proceso.
8. Determinar el equipo auxiliar necesario para el funcionamiento de la planta.
9. Hacer un análisis de los controles manuales y automáticos necesarios para el desempeño óptimo del proceso.

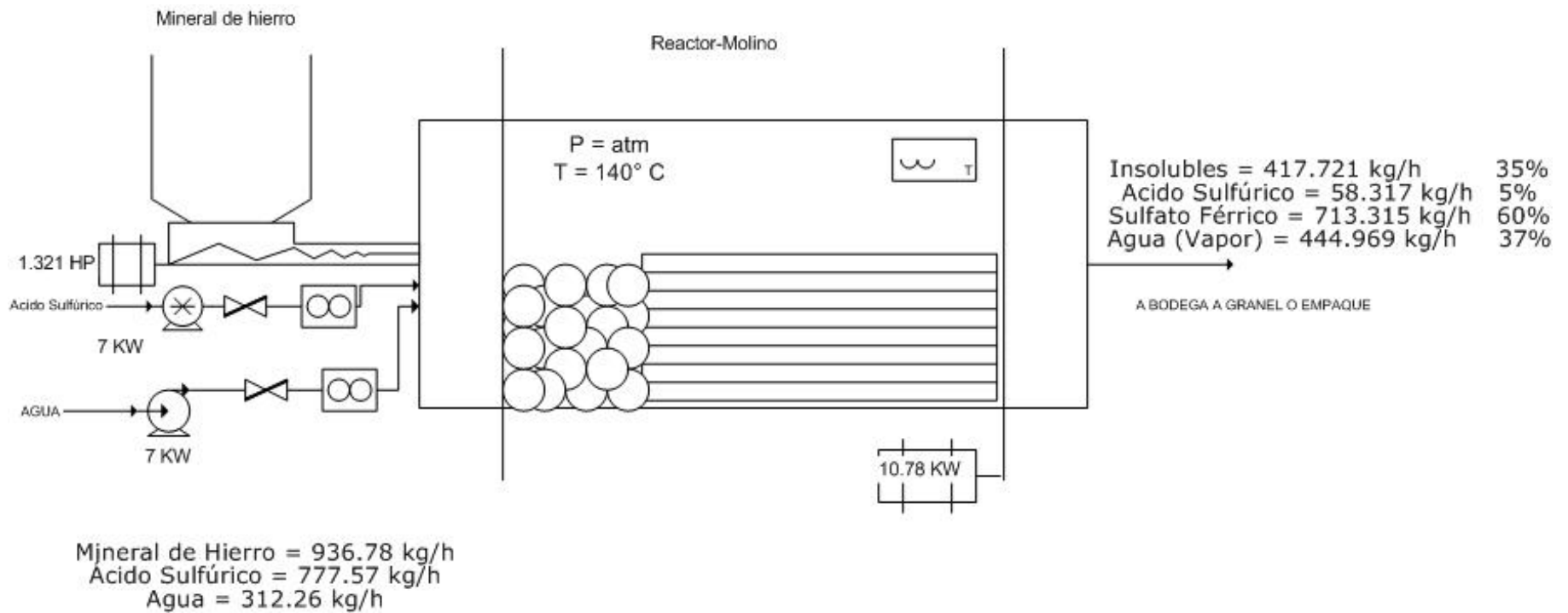
### **Fase 2: Análisis económico**

1. Realizar un análisis de inversión inicial
2. Realizar un análisis de costo operacional.
  - a. Costos directos de fabricación
  - b. Costos indirectos de fabricación
  - c. Gastos administrativos
3. Realizar una investigación de mercado
  - a. Estudiar la competencia directa e indirecta
  - b. Analizar los precios de venta
4. Calcular el punto de equilibrio de acuerdo a un pronóstico de ventas y el análisis económico anterior.
5. Calcular la recuperación de inversión inicial (Tasa Interna de Retorno).

## VII. RESULTADOS

### A. Estudio técnico

Ilustración 1: Diagrama de flujo del proceso



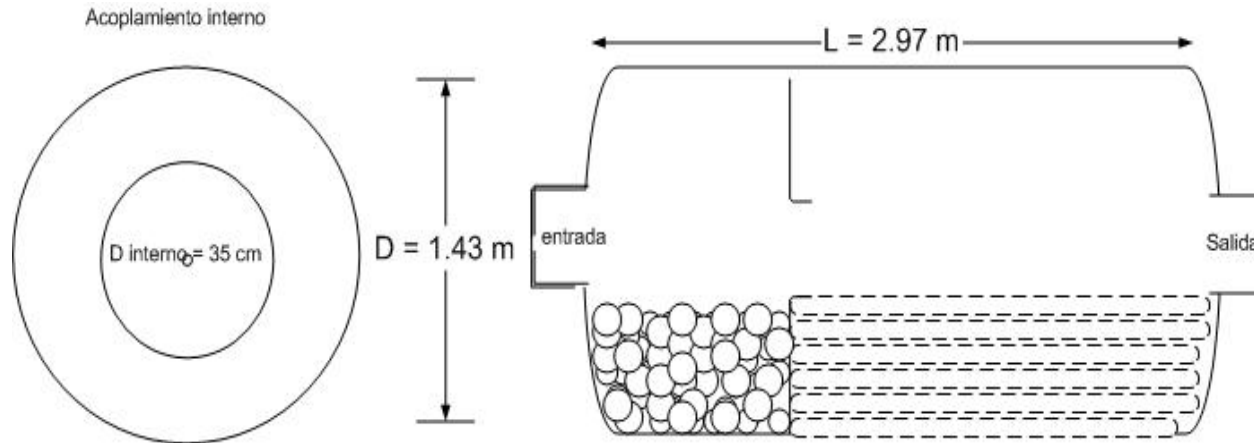
**Tabla 3. Condiciones de proceso**

<b>Especificaciones</b>	<b>Material a mover</b>	<b>Flujo entrada kg/s</b>	<b>Flujo salida kg/s</b>	<b>Tipo de flujo</b>	<b>Potencia kW</b>	<b>Presión atm</b>	<b>T in ° C</b>	<b>T out ° C</b>
<b>Tanques</b>								
Tolva de alimentación de mineral de hierro	Mineral de hierro	1.439	0.654	polvo		1	22	22
<b>Reactores</b>								
Reactor-molino de barras	Sulfato Férrico	0.708	0.554	sólido granulado	0.001	1	22	140
Reactor-molino bolas	Mineral de hierro, agua y Ácido Sulfúrico	0.708	0.554	lodo	0.001	1	22	140
<b>Transportadores</b>								
Tornillo sin fin	Mineral de hierro	0.327	0.327	polvo	1	1	22	22
<b>Bombas</b>								
Centrífuga	Ácido Sulfúrico	0.272	0.272	líquido	7	1.332		
Bomba centrífuga	Agua	0.109	0.109	líquido	7	1		
<b>Motores</b>								
Motor 1	para tornillo				1.321			
Motor 3	para reactor				10.78			

**Tabla 4. Especificaciones de equipo y dimensiones**

<b>Especificaciones</b>	<b>Material de construcción</b>	<b>Material de construcción de sootería</b>	<b>Potencia KW</b>	<b>Capacidad Kg</b>	<b>Volumen m<sup>3</sup></b>	<b>Largo m</b>	<b>Ancho m</b>	<b>Diámetro m</b>	<b>Altura m</b>
<b>Tanques</b>									
Tolva de alimentación de mineral de hierro	Acero al carbón	Acero al carbón		4710.7	6.12	1.57	0.78		5
<b>Reactores</b>									
Reactor-molino bolas				224.3	0.66	0.595		1.189	
Reactor-molino de barras		(ver tabla 5)		897.1	2.64	2.378		1.189	
<b>Transportadores</b>									
Tornillo sin fin			1			1		0.23	
<b>Bombas</b>									
Centrífuga	Aleación hastelloy B o C	Concreto	7						
Bomba centrífuga	Acero al carbón	Concreto	7						
<b>Motores</b>									
Motor 1	Acero al carbón	Concreto	1.321						
Motor 3	Acero al carbón	Concreto	10.78						

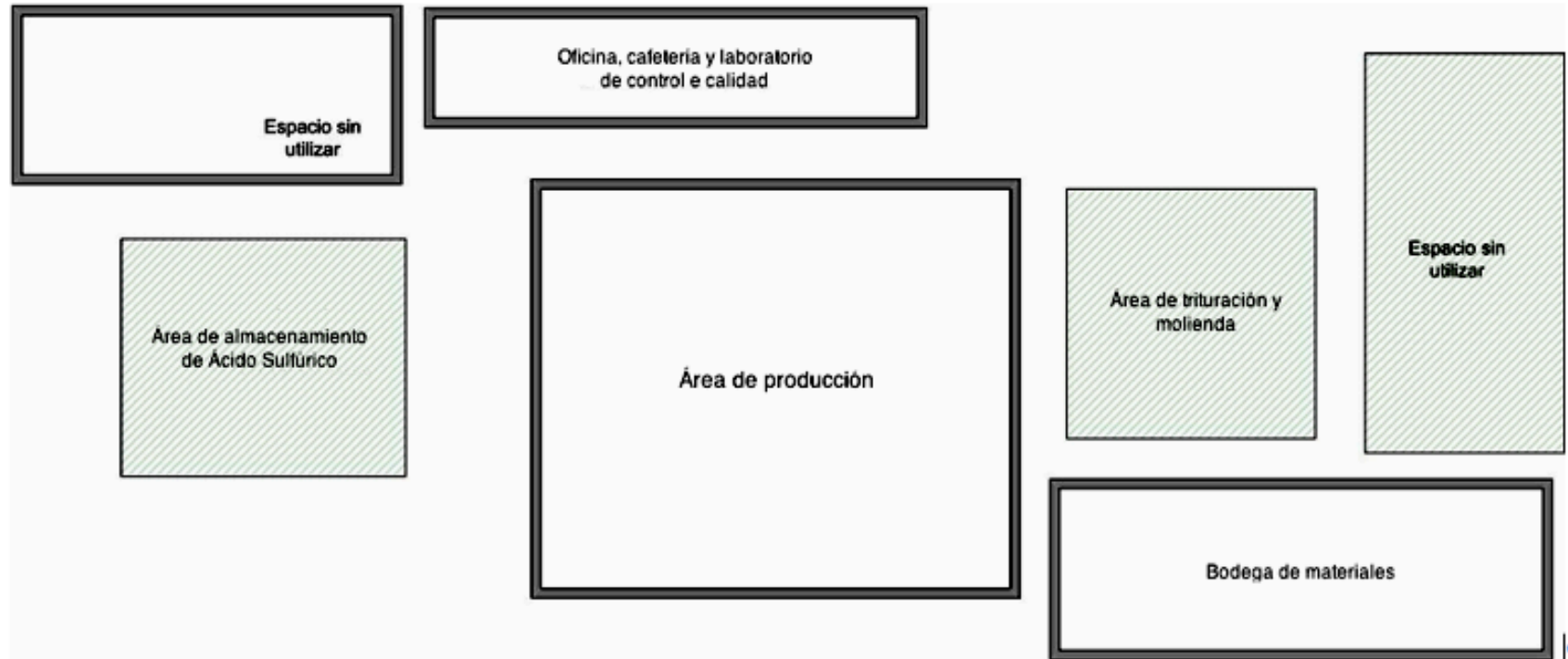
**Ilustración 2: Dimensiones del reactor**



**Tabla 5. Especificaciones del reactor**

Parte del reactor	Material de construcción:	Grosor (cm)	Composición química
1. Carcasa:	Acero al carbón	4	
2. Recubrimiento interno	Superrefractario de Bauxita electrofundida con liga secundaria de mullita.	15	89.8% de Óxido de Aluminio 9.5% de óxido de silicio
3. Bolas y rodillos	Refractario de carburo de silicio con liga de silicato	12.7	87.9% de Carburo de Silicio 9.6% de Óxido de Silicio
4. Acoplamiento interno	Superrefractario de Bauxita electrofundida con liga secundaria de mullita.	15	89.8% de Óxido de Aluminio 9.5% de óxido de silicio

**Ilustración 3: Distribución de la planta**



## B. Análisis económico

Tabla 6. Flujo de caja

	inicial Q.	año 1 Q.	año 2 Q.	año 3 Q.	año 4 Q.	año 5 Q.
<b>Ingresos</b>						
Bancos		798,787.20				
Capital de trabajo	1,693,018.32					
Ventas		3,087,767.96	3,402,946.06	5,073,026.83	6,374,308.44	8,163,663.08
<b>Total ingresos</b>		<b>3,886,555.16</b>	<b>3,402,946.06</b>	<b>5,073,026.83</b>	<b>6,374,308.44</b>	<b>8,163,663.08</b>
<b>Egresos</b>						
Equipo		72,162.47	0	0	0	0
Costos fijos de fabricación		586,172.89	625,914.71	668,438.47	713,938.89	773,251.61
Costos variables de fabricación		1,711,273.51	1,711,273.51	2,566,910.27	3,080,292.33	3,080,292.33
Anualidades e intereses bancarios		221,591.34	221,591.34	221,591.34	221,591.34	221,591.34
<b>Total egresos</b>		<b>2,591,200.22</b>	<b>2,558,779.57</b>	<b>3,456,940.08</b>	<b>4,015,822.56</b>	<b>4,075,135.28</b>
<b>Utilidades</b>						
<b>Utilidad bruta</b>		<b>1,295,354.94</b>	<b>844,166.49</b>	<b>1,616,086.74</b>	<b>2,358,485.88</b>	<b>4,088,527.79</b>
Impuestos		388,606.48	253,249.95	484,826.02	707,545.77	1,226,558.34
depreciaciones		72,162.47	72,162.47	72,162.47	72,162.47	72,162.47
<b>Utilidad neta</b>		<b>906,748.46</b>	<b>590,916.54</b>	<b>1,131,260.72</b>	<b>1,650,940.12</b>	<b>2,861,969.46</b>
Dividendos		15%	30%	35%	40%	50%
<b>Total utilidad neta (nuevo capital de trabajo)</b>		<b>770,736.19</b>	<b>413,641.58</b>	<b>735,319.47</b>	<b>990,564.07</b>	<b>1,430,984.73</b>
<b>Flujo de caja</b>						
Flujo de caja	(1,693,018.32)	770,736.19	413,641.58	735,319.47	990,564.07	1,430,984.73
Flujo de caja acumulativo	(1,693,018.32)	(922,282.12)	(508,640.54)	226,678.92	1,217,242.99	2,648,227.72

**Tabla 7. Valor Actual Neto y Tasa Interna de Retorno**

	inicial Q.	año 1 Q.	año 2 Q.	año 3 Q.	año 4 Q.	año 5 Q.
<b>Flujo de caja</b>	(1,693,018.32)	770,736.19	413,641.58	735,319.47	990,564.07	1,430,984.73
	V. A. N.		1,151,587.45			
	TIR		36%			

**Tabla 8. Tiempo de recuperación de la inversión**

	inicial Q.	año 1 Q.	año 2 Q.	año 3 Q.	año 4 Q.
<b>Flujo de caja acumulativo</b>	(1,693,018.32)	(922,282.12)	(508,640.54)	226,678.92	1,217,242.99
	$y = 943175.71x - 1410591.40$ $x = 1.50 \text{ años}$				

**Tabla 9. Punto de equilibrio**

	año 1	año 2	año 3	año 4	año 5
	Sacos (50kg)	Sacos (50kg)	Sacos (50kg)	Sacos (50kg)	Sacos (50kg)
Q=CF/(P-CuV) ideal	39,802.00	26,083.47	21,197.79	17,352.38	12,043.55
Q real	34,944.00	34,944.00	52,416.00	62,899.20	62,899.20
Qideal/Qreal	0.88	1.34	2.47	3.62	5.22

## VIII. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El proceso de fabricación de Sulfato Férrico consiste principalmente en un reactor en el cual se lleva a cabo la reacción entre Óxido Férrico y Ácido Sulfúrico. El reactor está dividido en dos secciones. La primera sección es un molino de bolas en el cual se alimentan y se mezclan todos los componentes que intervienen en el proceso: agua, mineral de hierro (Óxido Férrico al 45% (m/m) y Ácido Sulfúrico al 98% (m/m). Durante este período de mezcla, se eleva la temperatura alrededor de 110 °C debido al calor de disolución del Ácido Sulfúrico en el agua. Esta temperatura es suficiente para vencer la energía de activación (75 °C) y que comience la reacción. Esta temperatura se alcanza con el calor liberado de la dilución del Ácido Sulfúrico en agua y por lo tanto no es necesaria una fuente de energía externa. Para comprobar esto se realizaron diferentes pruebas en donde se comparó el calor liberado y el tiempo que tardó en comenzar la reacción. Se notó que se aumentaba más rápido cuando se mezclaba los tres componentes, Ácido Sulfúrico, agua y mineral de hierro, al mismo tiempo, que si se mezclaba primero el agua con el mineral y luego se agregaba el ácido.

Una vez se sobrepasa la energía de activación, la reacción comienza y libera calor. Este calor liberado permite que se evapore todo el agua que se alimentó y se formó durante la reacción y se obtenga un producto sólido. Este sólido se conforma principalmente por mineral de hierro cubierto por una capa de Sulfato Férrico. El medio de molienda (bolas) es necesario para romper estos grumos y permitir que se exponga nuevamente el mineral de hierro y reaccione con el Ácido Sulfúrico que aún hay en el medio.

La segunda fase de este reactor consiste en un molino de rodillos. Se alimenta el lodo por medio de rebalse proveniente de la primera etapa<sup>10</sup>. En esta etapa se termina de completar la reacción utilizando el mismo principio que en la primera fase. Se termina de evaporar el agua y se termina de homogenizar el tamaño particular del producto final. La conversión obtenida al final de la reacción es de 90%.

La razón de dividir el reactor en dos partes es porque al inicio se necesita un medio de molienda más fuerte que al final del proceso de reacción. Al inicio se necesita una mayor fuerza para evitar que disminuya la conversión y romper los gránulos formados de mineral de hierro recubiertos con una capa de Sulfato Férrico. A medida que se obtiene una mayor conversión, lo que se busca es evitar

---

<sup>10</sup> Referirse al diagrama del equipo en la sección de resultados, pág 20.

que el tamaño particular sea menor que el especificado para que no haya necesidad de utilizar un equipo de aumento de tamaño después de la etapa de reacción y para esto se necesita menor potencia en la molienda. Otra razón para dividir en dos partes el reactor es que se quiere evitar que el Ácido Sulfúrico y mineral de hierro, debido a que el reactor tiene un grado de inclinación, corran al final del reactor y disminuya el área de contacto entre el mineral de Hierro y el Ácido Sulfúrico haciendo que se disminuya la eficiencia.

La alimentación al reactor se hace independientemente para cada compuesto. Se alimenta el mineral de Hierro previamente triturado y molido<sup>11</sup> con un rango de diámetro de partícula tal que pase a través de una malla entre No. 60 y No. 100. Este tamaño de diámetro de partícula es necesario para permitir una mayor área de contacto con el Ácido Sulfúrico y consecuentemente, aumentar la conversión en la reacción. Se utiliza un tornillo sin fin para mantener un flujo constante del polvo a la entrada del reactor.

Para alimentar el agua y el Ácido Sulfúrico, se utiliza una bomba centrífuga respectivamente, cada una construida del material adecuado. En el caso de agua, se seleccionó un material de construcción de acero al carbón debido que el agua es un material que no presenta ningún tipo de corrosividad ni toxicidad. Para el Ácido Sulfúrico, se seleccionó una aleación Hastelloy tipo B o C ya que el Ácido Sulfúrico sí es un material con un alto grado de corrosividad y toxicidad, especialmente a altas temperaturas. El flujo másico del agua debe de ser tal que se mantenga en una proporción entre 25 y 30% con respecto al mineral de hierro. La cantidad de agua debe de ser la menor posible, para lograr evaporarla y obtener un producto seco y debe ser la suficiente para lograr vencer la energía de activación de la reacción con el calor de dilución del Ácido Sulfúrico en éste.

La idea inicial era formar un lodo de mineral con agua y alimentar al reactor el lodo y el ácido. Esta idea se descartó al notar que se requería de más energía para alimentar los componentes, es decir, se necesitaba una bomba extra que alimentara el lodo. Además, se estaba desaprovechando una de las características principales del reactor, el molino de bolas, el cual tiene una potencia de molienda suficiente para mezclar y formar el lodo.

El tiempo de residencia dentro del reactor es aproximadamente de 45 minutos, este se puede variar si se modifica el grado de inclinación de reactor. El tiempo de residencia depende, principalmente, del diámetro de partícula que se desea del producto. Según las especificaciones del Sulfato Férrico, el diámetro de

---

<sup>11</sup> Esta etapa del proceso no se incluye en el diseño debido a que la planta ya cuenta con este equipo.

partícula debe de ser tal que el 95% pase a través de una malla No. 3. Para un mayor tiempo de residencia, el equipo es más grande y se obtiene un menor diámetro de partícula en el producto terminado.

Al final del proceso se obtiene Sulfato Férrico anhídrido y granular. En un principio se pensó en colocar un equipo de aumento de tamaño luego de completar la etapa de reacción. Esto se necesitaría debido a que se había considerado únicamente un molino de bolas y con este tipo de molienda se obtiene producto con un diámetro de partícula fino, como se explicó anteriormente. El diseño actual permite eliminar esta fase del proceso. Se debe tomar en cuenta que la variable crítica en el proceso, es el tiempo de residencia dentro del reactor. Este se puede variar ajustando el ángulo de inclinación en el equipo o variando la velocidad de flujo de la materia prima. Para un mejor control de calidad, se puede colocar un seleccionador de tambor al final del reactor. En este caso, se necesita un control automático de lazo cerrado en el que aumente o disminuya el flujo de los componentes según la masa que se mide del producto que se encuentra dentro de los límites especificados de tamaño de partícula.

La cantidad producida es alrededor de 1.8 Tm/h (2 ton/h). Es necesario aclarar que de esta cantidad solo el 60% es Sulfato Férrico. Esto es debido a que la materia prima utilizada sólo contiene 45% de Óxido Férrico. El resto del producto insoluble no es necesario removerlo del producto final, ya que el precio se establece según el porcentaje de Sulfato Férrico. Además, en algunos casos en la fase de coagulación en el proceso de tratamiento de aguas, los insolubles ayudan a aumentar la turbidez que es necesaria para la precipitación de los coágulos y al final se retiran del agua junto con los lodos sedimentados. La cantidad de Óxido Férrico puede variar en cada lote que se compre de mineral de hierro. Es necesario tener procedimientos establecidos de análisis cuantitativo de la materia prima para mantener la calidad del producto final. En caso de que el mineral de Hierro tenga más o menos % (m/m) de Óxido Férrico, así debe ser el flujo de Ácido Sulfúrico que debe ingresar al reactor.

El flujo del ácido y del agua se deben poder regular, como se explicó con anterioridad, utilizando las válvulas adecuadas. Estas válvulas pueden ser de mariposa y debe estar incorporado un rotámetro para regular la velocidad de flujo. Estas válvulas, eventualmente, pueden estar conectadas a controladores para regular la temperatura dentro del reactor o el diámetro de partícula de salida.

La selección del material de construcción es bastante delicada debido a las propiedades corrosivas del Sulfato Férrico y Ácido Sulfúrico a altas temperaturas. En principio se decidió construir el reactor de hierro dulce con un recubrimiento de un súper-refractario antiácido. La segunda opción era construir el equipo directamente de un material súper-refractario que fuera capaz de soportar condiciones extremas como temperatura, esfuerzos cortantes, abrasión y corrosión. Las dos opciones son viables y la decisión deberá ser tomada basándose en los costos. Debido a que, en Guatemala, no hay disponibilidad de estos materiales refractarios antiácidos, es necesario importar los materiales y por lo tanto se considera que el precio será mayor si se construye directamente de este material. Además, si se daña alguna pieza construida con este material, se perdería demasiado tiempo en esperar que se mandara a traer una pieza nueva y esto involucraría una pérdida debido al paro en la producción. En el otro caso, si se utiliza un concreto súper-refractario como recubrimiento, se puede hacer un mantenimiento preventivo cada cierto tiempo y evitar este tipo de pérdidas. Otra de las ventajas de utilizar un concreto refractario, es que se puede moldear de tal forma que reduzca las áreas muertas dentro del reactor, donde se quedaría atrapado materia prima o producto sin reaccionar.

Para el dimensionamiento del equipo se utilizaron criterios teóricos debido a que no se logró hacer pruebas que representaran el tipo de proceso que se desea llevar a cabo. Las pruebas realizadas permitieron conocer las condiciones a las que se lleva a cabo la reacción pero no se obtuvo ninguna información experimental sobre el proceso. En las pruebas realizadas se obtuvo una conversión de reacción aproximadamente del 80% pero el dimensionamiento se basó en una conversión del 90% debido a que las pruebas fueron de tipo lote y se espera una mayor conversión en un sistema continuo. Además, se utilizó esta conversión para obtener un producto con las especificaciones deseadas sin necesidad de hacer ningún tratamiento posterior. Entre estas especificaciones se puede mencionar una acidez menor al 5% (m/m) y un porcentaje de hierro soluble de 18% (m/m).

En la distribución de la planta se puede apreciar dos espacios sin utilizar que son aptos para colocar el nuevo equipo. En uno de los espacios está más cerca del área de almacenamiento de Ácido Sulfúrico y de materiales peligrosos, y el otro espacio disponible se encuentra cerca del área de molienda y de almacenamiento de materia prima. Los dos lugares son convenientes. Por una parte, es más fácil transportar en un montacargas, cada 4 horas, mineral de Hierro que bombear Ácido Sulfúrico 20 m. El lugar que presenta más ventajas es

el que se encuentra cerca de los tanque de almacenamiento debido a que ya hay cierta infraestructura y no es necesario invertir en obra civil.

La estimación de la inversión inicial se basó únicamente en el costo de la construcción e instalación de equipo debido a que los demás costos involucrados como terreno, mobiliario y gastos de organización ya fueron absorbidos en otras áreas de la empresa. La inversión inicial se calculó a partir del método estimado de costos. Este método permite obtener tanto los costos del equipo como los costos de la soportaría, tubería y accesorios, instalación del equipo, y también toma en cuenta los materiales de construcción. Este método no es tan exacto como el método detallado pero para fines de un análisis de rentabilidad proporciona datos confiables que permiten a grandes rasgos tomar una decisión.

Los costos de operación se calcularon para 120 días en el primer año, a partir de los requerimientos de materia prima directa e indirecta, material de empaque, consumos energéticos, mano de obra, combustibles, durante el proceso. Para el resto del tiempo se calculó para 60 días. Entre el cálculo de precio de venta también se incluyó los gastos financieros (depreciaciones y amortizaciones) y administrativos. Los costos de la fase de pre-tratamiento del mineral de hierro, esto incluye la trituración y molienda, la materia prima (en este caso, mineral de hierro) se incluyen únicamente en los costos de consumo energético y mano de obra debido a que este es un equipo que ya se tiene en la planta.

El flujo de caja se proyectó a cinco años, considerando que las ventas son suficientes para recuperar la inversión inicial en ese tiempo. Las ventas totales se estimaron asumiendo que en los primeros años se producía al 50% de su capacidad máxima y poco a poco se irá posicionando el producto en el mercado y llegar a la máxima producción. El precio de venta se estimó utilizando un margen de ganancia tal que el precio se mantuviera por debajo del precio de la competencia. Este margen corresponde al 20% para el primer año hasta llegar a un 40% en el quinto año. Este margen de ganancia se estableció de esta manera como una estrategia de venta. Los primeros años es importante que se venda el producto y cubrir el mercado.

La Tasa Interna de Retorno se obtuvo con un valor del 36%. Este valor es un indicador de que el proyecto es rentable tomando en cuenta que los costos de inversión inicial se pueden reducir, considerablemente, debido a que los costos estimados son sobre equipos comerciales y se pretende fabricar e instalar equipos con materiales nacionales. A demás se puede reducir gastos de administración y costos de fletes. La rentabilidad del proyecto se debe principalmente a los bajos

costos de operación debido a la simplicidad del proceso. Se le puede atribuir también a los bajos costos en la materia prima principal, el mineral de hierro.

La inversión inicial se recupera a la mitad del primer año. Esto es un tiempo corto, lo que indica que el proyecto es bastante rentable. Para el primer año se asume que una tercera parte de lo que se produjo es pérdida en el arranque de la planta. El punto de equilibrio se encuentra a principios del primer año. Es necesario tomar en cuenta que se asume que todo lo que se produce se vende.

## **IX. CONCLUSIONES**

1. La producción de Sulfato Férrico anhídrido y granular es un proyecto rentable debido a los bajos costos de operación y el bajo costo de su materia prima principal, el mineral de Hierroférrico.
2. El calor de dilución de Ácido Sulfúrico en agua, es suficiente para proporcionarle calor al proceso y no tener necesidad de contar con una fuente de calor externa para el proceso. Esto reduce costos de operación y simplifica el proceso.
3. El material de construcción del reactor, la operación unitaria principal del proceso, es hierro negro en la carcasa y es recubierto por un concreto refractario anti-ácido que protege el equipo de la corrosión del Sulfato Férrico y el Ácido Sulfúrico caliente. Además el recubrimiento permite eliminar puntos muertos dentro del reactor.
4. El análisis económico muestra que el proyecto es rentable y que se recupera la inversión en 1.5 años, con una Tasa Interna de Retorno del 36%.

## **X. RECOMENDACIONES**

1. Se recomienda considerar, a largo plazo, un cambio de materia prima principal, mineral de hierro, a un mineral que tenga mayor contenido de Óxido Férrico y aumentar el rendimiento del proceso.

## XI. BIBLIOGRAFÍA

1. Carborundum. *Carbofrax*® *Súper Refractarios de Carburo de Silicio*. Mexico DF, México. Compañía Nacional de Abrasivos S. A.
2. Evrill, N. Rooke. (1989). *U.S. Patent No. 4814158. Process for making liquid ferric sulfate*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office. 4 pág.
3. Kirk, R. E. (1961). *Enciclopedia de Tecnología Química*. México. Unión Tipográfica Hispanoamericana.
4. Plummer, J. K. (1941). *U.S. Patent No. 225332. Process for making ferric sulfate*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
5. Satterwhite, William. A., et al. (1974). *U.S. Patent No. 3954953. Energy conserving process for manufacturing ferric sulfate*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office. 6 pág.
6. Wilder, B. H. (1992). *Standard for Ferric Sulfate. American Water Works Association*. Extraído de: <http://apps.awwa.org/WaterLibrary/showabstract.aspx?an=0033844>
7. Wilson, W. S. (1939). *U.S. Patent No. 2173144. Method of preparing normal ferric sulphate*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office. 4 pág.
8. MMSD-LA. (2003). *Disponibilidad de mineral de hierro en Guatemala*. Extraído de: [http://www.mmsd-la.org/documentos/presenta\\_economica.pdf](http://www.mmsd-la.org/documentos/presenta_economica.pdf)
9. ASIMET. (2003). *Mineral de Hierro en Latinoamerica*. Santiago, Chile. Extraído de: [http://www.asimet.cl/hierro\\_latinoamerica.htm](http://www.asimet.cl/hierro_latinoamerica.htm)

## XII. APÉNDICE

### A. Análisis experimental

El objetivo de esta fase de experimentación fue analizar el comportamiento de la reacción, determinar el calor liberado por la reacción, al igual que la cantidad de calor necesaria para activar la reacción y determinar las proporciones adecuadas de materiales que se deben de alimentar al reactor.

Se prepararon 5 muestras con diferentes proporciones de materiales. A continuación se muestra un cuadro.

**Tabla 10. Proporciones alimentadas de agua y mineral de hierro.**

Prueba	% agua (m/m)	% mineral hierro (m/m)
1	25%	75%
2	40%	60%
3	20%	80%
4	27%	73%

La cantidad de Ácido Sulfúrico se calculó estequiométricamente.

**1. Análisis cualitativo.** En la primera prueba se agregó el agua y el mineral, y se agitó hasta obtener un lodo homogéneo. Luego se comenzó a agregar el ácido gota por gota hasta que comenzara la reacción. Una vez comenzada la reacción, se agitó hasta que terminara y se obtuviera un producto granular, grisáceo y seco.

Se observó que se tomó demasiado tiempo en aumentar la temperatura e iniciar la reacción y se obtuvo un producto bastante húmedo y el color no fue el adecuado (esto significa que todavía tenía mineral de Hierro sin reaccionar).

La segunda prueba se agregó mayor cantidad de agua, pero se agregó el ácido más rápido. Se observó que se llegó a la energía de activación más rápido pero de igual forma que en la primera prueba, se obtuvo un producto húmedo.

La tercera prueba, se agregó menor cantidad de agua pero esta vez se adicionaron el ácido y el agua por goteo simultáneamente. Se observó que se liberó más calor y se elevó la temperatura rápidamente y se obtuvo un producto grisáceo y seco.

La cuarta prueba se realizó de la misma forma que en la tercera, pero se obtuvo un producto húmedo debido a que se agregó mayor cantidad de agua.

Se observó que la reacción comenzaba cuando se llegaba a 75 °C y una vez comenzada la reacción, la temperatura alcanzaba los 140 °C.

Luego de una semana de reposo de las pruebas, se observó que las pruebas 1, 2, y 4 les había crecido un hongo.

Se llegó a la conclusión que al agregar el ácido y el agua simultáneamente se libera la suficiente cantidad de calor para elevar la temperatura y vencer la energía de activación y que comience la reacción.

**2. Análisis cuantitativo.** A cada una de las pruebas, luego de haber enfriado completamente, se determinó la cantidad de insolubles, ácido libre y hierro soluble. A partir de estos datos se determinó el rendimiento de la reacción.

Primero se filtró 5 gramos del producto para separar el hierro soluble de los insolubles. Los insolubles se secaron en un crisol y se pesaron. La solución de hierro se tituló con EDTA para determinar la cantidad de hierro soluble y con NaOH para la determinación de ácido.

Los resultados se muestran a continuación

**Tabla 11. Análisis de composición del producto**

Prueba	% ácido libre (m/m)	%Fe III (m/m)	Conversión a Sulfato Férrico %(m/m)
1	2%	11%	40%
2	1%	19%	67%
3	1%	22%	80%
4	2%	12%	42%

## B. Balance de masa

El balance de masa se calculó a partir de una producción de **1086.96 kg/h** de Sulfato Férrico puro, con una eficiencia de reacción del **90%**, a partir de un mineral de Hierro con la siguiente composición:

**Tabla 12. Análisis de mineral de Hierro de Jocotán, Chiquimula**

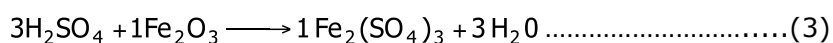
Compuesto	% (m/m)
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	45.05%
Fe <sup>+3</sup>	31.51%
Al	0%
Zn	2.86%
Ca	0%
Insolubles	47%

Es importante aclarar que la cantidad que se obtiene como producto es 1495 kg/h (2 ton/h) de Sulfato Férrico aproximadamente con la siguiente composición:

**Tabla 13. Análisis de Sulfato Férrico**

Compuesto	% (m/m)
Mineral de hierro (insolubles)	35%
Ácido libre	5%
Sulfato Férrico	60%
Total	100%

La reacción que se lleva a cabo entre el Óxido Férrico y el Ácido Sulfúrico es



**Cálculo 1: Flujo másico de mineral de hierro.** Todos los cálculos de flujo másico se realizaron de la misma forma.

$$\left[ \frac{1086.46 \frac{\text{kg Fe}_2(\text{SO}_4)_3}{\text{h}} \left( \frac{399.9 \text{ kgmol Fe}_2(\text{SO}_4)_3}{1 \text{ kg Fe}_2(\text{SO}_4)_3} \right) \left( \frac{1 \text{ kgmol Fe}_2\text{O}_3}{1 \text{ kgmol Fe}_2(\text{SO}_4)_3} \right) \left( \frac{159.7 \text{ kg Fe}_2\text{O}_3}{1 \text{ kgmol Fe}_2\text{O}_3} \right) \right] \left( \frac{100\% \text{ Mineral de Hierro}}{45.05\% \text{ Fe}_2\text{O}_3} \right) 0.9 = 1177.66 \frac{\text{kg Mineral de Hierro}}{\text{h}}$$

**Cálculo 2: Flujo másico de salida de mineral de hierro.** Debido a que el mineral de Hierro tiene únicamente 45% de Óxido Férrico y todo el resto de material es inerte a la reacción, el cálculo se hizo de la siguiente manera:

$$1177.66 \frac{\text{kg Mineral de Hierro}}{\text{h}} - 1177.66 \frac{\text{kg Mineral de Hierro}}{\text{h}} \left( \frac{45.05\% \text{ kg Fe}_2\text{O}_3}{100\% \text{ Mineral de Hierro}} \right) (0.90) = 525.13 \frac{\text{kg Mineral de Hierro}}{\text{h}}$$

**Cálculo 3: Flujo volumétrico de entrada de mineral de hierro.**

$$1177.66 \frac{\text{kg Mineral de Hierro}}{\text{h}} \left( \frac{1 \text{ m}^3 \text{ Mineral de Hierro}}{923.5 \text{ kg Mineral de Hierro}} \right) = 1.275 \frac{\text{m}^3 \text{ Mineral de Hierro}}{\text{h}}$$

Todos los cálculos de flujo volumétrico se hicieron de la misma manera.

**Cálculo 4: Flujo molar de Óxido Férrico.** El flujo molar del mineral de Hierro se calculó basado en el flujo másico del Óxido Férrico únicamente debido a que este es el único componente del mineral que es de utilidad en la reacción.

$$1177.66 \frac{\text{kg Mineral de Hierro}}{\text{h}} \left( \frac{45.05\% \text{ kg Fe}_2\text{O}_3}{100\% \text{ Mineral de Hierro}} \right) \left( \frac{1 \text{ kg mol Fe}_2\text{O}_3}{159.7 \text{ kg Fe}_2\text{O}_3} \right) = \frac{3.322 \text{ kgmol Fe}_2\text{O}_3}{\text{h}}$$

A continuación se muestra un cuadro de resumen del balance de masa. Tomar en cuenta que \*El flujo molar del mineral de hierro se calculó basado en el flujo másico del Óxido Férrico únicamente debido a que este es el único componente del mineral que es de utilidad en la reacción. \*\*Todo el agua que entro sale en forma de vapor.

**Tabla 14. Resumen de balance de masa**

Material	Entra			Sale		
	kg/h	Kg mol/h	m <sup>3</sup> /h	kg/h	Kg mol/h	m <sup>3</sup> /h
Mineral de Hierro	1177.66	3.322*	1.275	525.135	0.332	0.198
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	977.51	9.966	0.5325	73.313	0.997	0.0533
Fe <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	0	0	0	896.739	2.99	1.357
H <sub>2</sub> O	392.55	24.535	0.393	559.39	46.616**	0.746
Total	2547.73		2.2	1495.18		2.354

## C. Dimensionamiento del equipo

**1. Dimensionamiento del reactor.** El reactor se divide en dos fases principales: la etapa de mezcla y la etapa de homogenización y secado. El material se traslada de una fase a otra por medio de rebalse dentro del reactor.

Los criterios utilizados para el diseño de este equipo son los siguientes: el tiempo de residencia del material dentro del reactor y las relaciones de dimensión de los molinos de bolas y rodillos ya que de estos depende el porcentaje de humedad y el diámetro particular del producto.

**Cálculo 5: Determinación de volumen efectivo del reactor.** Este cálculo se basó en el flujo másico total que entra al reactor, debido a que este ocupa un mayor volumen que el flujo que sale del reactor.

El tiempo de residencia que generalmente se utiliza para los molinos de bolas y barras es aproximadamente de 1 h. El tiempo de residencia establecido para este reactor es de 45 min debido a que se desea obtener un tamaño particular granular y por esto se debe de minimizar el tiempo de residencia lo más posible. Se debe de tomar en cuenta que estos equipos generalmente tienen un ángulo de inclinación que reducirá el tiempo de residencia aún más.

$\text{flujo volumétrico de entrada} = 1.65 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \quad \text{tiempo de residencia} = 0.75 \text{ h}$ $\text{relación } V_{\text{producto}}/V_{\text{reactor}} = 0.55$ $\text{volumen de producto} = 1.65 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \left( \frac{0.75 \text{ h}}{0.55} \right) = 3.00 \text{ m}^3$ $\text{margen de seguridad} = 10\% \quad \text{volumen total del reactor} = 3.30 \text{ m}^3$
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

**Cálculo 6: Dimensiones de cada fase del reactor.** Las relaciones de dimensión especificadas para este tipo de molinos son:

Molino de bolas: relación  $L_1/d = 0.5$

Molino de barras: relación  $L_2/d = 2$

Si el diámetro es el mismo para ambas fases, entonces se puede determinar la relación  $L_1/L_2$ .

$$\begin{aligned} d &= \frac{L_1}{0.5} & d &= \frac{L_2}{2} \\ \frac{L_1}{0.5} &= \frac{L_2}{2} \Rightarrow L_1 = \frac{L_2 \times 0.5}{2} = L_2 \times 0.25 \\ & L_1 &= & 0.25L_2 \end{aligned}$$

Si el volumen total del reactor es  $3.30 \text{ m}^3$

$$\begin{aligned} V &= 3.30 \text{ m}^3 = \frac{\pi d^2}{4} (L_1 + L_2) \\ d &= \frac{L_2}{2} = \frac{L_1}{0.5} \\ V &= \frac{\pi \left(\frac{L_2}{2}\right)^2 (L_2 + 0.25L_2)}{4} = \frac{\pi \left(\frac{L_2}{2}\right)^2 (1.25L_2)}{4} = \frac{\pi 1.25(L_2)^3}{16} \Rightarrow L_2 = \sqrt[3]{\frac{V \times 16}{\pi 1.25}} = 2.38 \text{ m} \\ L_1 &= 0.25L_2 = 0.59 \text{ m} \\ d &= \frac{L_2}{2} = 1.19 \text{ m} \\ V_1 &= \frac{(1.19 \text{ m})^2 \pi}{4} \times 0.59 \text{ m} = 0.66 \text{ m}^3 \\ V_2 &= \frac{(1.19 \text{ m})^2 \pi}{4} \times 2.38 \text{ m} = 2.64 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

**Cálculo 7: Cálculo del tiempo de residencia del producto en cada fase.** El tiempo de residencia debe ser tal que se mantenga la relación  $V_{\text{producto}}/V_{\text{reactor}} = 0.55$

$$\begin{aligned} \text{Fase 1} &= 80\% \\ \text{Fase 2} &= 20\% \\ \text{tiempo total} &= 0.75 \text{ h} \\ \text{Tiempo fase 1} &= 0.75 \text{ h} \times 0.80 = 0.60 \\ \text{Tiempo fase 2} &= 0.75 \text{ h} \times 0.20 = 0.15 \end{aligned}$$

Para estos tiempos, la relación  $V_{\text{producto}}/V_{\text{reactor}}$  se mantiene alrededor de 0.53, lo cual es satisfactorio considerando que al volumen total se le dio un margen de seguridad del 10%.

**Cálculo 8: Velocidad crítica del reactor.** Según la información encontrada en la literatura, Se utiliza el mismo criterio para determinar la velocidad crítica de los molinos de bolas y de barras. La velocidad crítica para los molinos de barras es menor que la de bolas y por esto se utiliza la menor velocidad permitida para evitar que se obtenga un diámetro particular menor al deseado.

Radio de reactor = 1.19 m
$\text{Velocidad Crítica} = \frac{54.2}{\left(1.19\text{m} \left(\frac{3.28\text{ft}}{1\text{m}}\right)\right)^2} = 14.254 \text{ rpm}$
$\text{Velocidad mínima} = (\text{Velocidad Crítica})^{0.7} = 9.978 \text{ rpm}$
$\text{Velocidad Óptima} = (\text{Velocidad Crítica})^{0.75} = 10.691 \text{ rpm}$

**Cálculo 9: Potencia requerida para mover reactor.**

$P(\text{kW}) = 4 \times \text{Flujo Másico} = 4 \times 2.021 = 8.08 \text{ kW}$
$P_{\text{motor}} = P/?$
$? = \text{Eficiencia de Motor} = 75\%$
$P_{\text{motor}} = 8.08 \text{ kW} / 0.75 = 10.78 \text{ kW}$

**Cálculo 10: Carga de barras y bolas para cada fase del reactor.** La carga de rodillos y bolas debe de ser 0.45 del Volumen del Producto en el reactor. La carga depende del material del que se fabrica las barras y bolas. En este caso son de cerámica refractaria.

## 2. Dimensionamiento de tornillo dosificador de mineral de hierro

**Cálculo 11: Cálculo de tornillo dosificador de mineral de Hierro en el reactor.** Para este cálculo se necesita conocer la velocidad de flujo a la cual se desea alimentar el reactor, el tamaño particular del material a mover, y el área que ocupa el material dentro del equipo.

Es importante saber que mientras más área ocupa el material, menor es el tamaño del equipo, pero más potencia se necesita para mover el material.

- Flujo másico de Mineral de Hierro= 0.436 kg/s
- Flujo volumétrico de Mineral de Hierro= 4.633 E -4 m<sup>3</sup>/s
- Diámetro particular= 75% pasa a través de un tamiz de 100 mesh.

Según las estimaciones en las tablas del Manual de Ingenieros Químicos, el diámetro del tornillo debe ser de 0.23 m con un área de material de 15% y una velocidad del 50% de su velocidad crítica. La potencia requerida para este equipo es de 0.7 kW (1hp).

#### D. Análisis de costos

En esta sección se analizará los costos asociados con la compra de los equipos. El Análisis de Costos se realizó únicamente para determinar el capital fijo. éste incluye el costo de todos los equipos más el costo de instalación. Se calculó a partir del método gráfico donde están estimado los costos según las capacidades de los equipos. Luego se actualizó el costo para el año 2004 utilizando los índices de costos de plata de Chemical Engineering.

**Tabla 15. Estimación de costos de los equipos**

Especificaciones	Cpc 1982 \$	Cpc 2004 \$	Fm	Fp	Fbm	Cbm	
<b>Tanques</b>	<b>315</b>	<b>437.9</b>					
Tolva de alimentación	600.00	834.10			1.9	1,584.78	12,044.34
<b>Reactores</b>							
Reactor-molino	8,000.00	11,121.27	5	1	5	55,606.35	422,608.25
<b>Transportadores</b>							
Tornillo sin fin	1,000.00	1,390.16			2.2	3,058.00	23,243.45
<b>Bombas</b>							
Centrífugas	2,000.00	2,780.00	3.5	1	2.5	9,731.11	73,956.44
Bomba centrífuga	2,000.00	2,780.32	1	1	1	2,780.32	21,130.41

Según las estimaciones anteriores, el costo total del equipo e instalaciones es de Q. 555,095.94. A continuación se presenta los cálculos estimados de los costos operacionales y capital de trabajo.

A continuación se calcula la inversión inicial sobre la adquisición de activos. Como se puede ver en el cálculo, no se toma en cuenta la inversión de terrenos, mobiliario y otros porque la empresa ya cuenta con estas instalaciones.

**Tabla 16. Inversión inicial**

<b>Elemento de costo</b>	<b>Q.</b>
Inversión total maquinaria y equipo	555,095.94
Inversión en edificios e infraestructura	-
<b>Inversión en activos fijos</b>	
Terreno	-
Edificios e infraestructura	-
Maquinaria y equipo de producción	555,095.94
Instalaciones	166,528.78
Vehículos	-
Mobiliario y equipo	-
<b>TOTAL</b>	<b>721,624.72</b>
<b>Inversión diferida</b>	
Gastos de organización	-
Imprevistos y efectivo	72,162.47
<b>TOTAL</b>	<b>72,162.47</b>
<b>Registros de marca</b>	<b>5,000.00</b>
<b>INVERSIÓN INICIAL</b>	<b>798,787.20</b>

Una vez se tiene la inversión inicial sobre el equipo, se necesita calcular el capital de trabajo y el precio de venta que también es una inversión fuerte en el primer año.

**Tabla 17. Costos y gastos fijos de fabricación**

<b>Elemento de Costo</b>	<b>año 1 (Q)</b>	<b>año 2 (Q)</b>	<b>año 3 (Q)</b>	<b>año 4 (Q)</b>	<b>año 5 (Q)</b>
Sueldos y prestaciones	8,107.50	8,675.03	9,282.28	9,932.04	10,627.28
Gastos de oficina	3,000.00	3,210.00	3,434.70	3,675.13	3,932.39
Diesel	7,200.00	7,704.00	8,243.28	8,820.31	9,437.73
Repuestos de vehículos	1,000.00	1,070.00	1,144.90	1,225.04	1,310.80
Otros	2,000.00	2,140.00	2,289.80	2,450.09	2,621.59
Mantenimiento	13,877.40	14,848.82	15,888.23	17,000.41	18,190.44
<b>TOTAL ANUAL</b>	<b>35,184.90</b>	<b>37,647.84</b>	<b>40,283.19</b>	<b>43,103.01</b>	<b>56,747.50</b>
Seguro	14,432.49				
<b>TOTAL</b>	<b>49,617.39</b>	<b>52,080.34</b>	<b>54,715.68</b>	<b>57,535.51</b>	<b>71,180.00</b>
<b>Elemento de gasto</b>					
Sueldos y prestaciones	8,107.50	8,675.03	9,282.28	9,932.04	10,627.28
Electricidad de las oficinas	4,800.00	5,136.00	5,495.52	5,880.21	6,291.82
Comunicaciones	3,500.00	3,500.00	3,500.00	3,500.00	3,500.00
Papelería y gastos de oficina	3,000.00	3,210.00	3,434.70	3,675.13	3,932.39
Mantenimiento de oficinas	500.00	500.00	500.00	500.00	500.00
imprevistos	800.00	856.00	915.92	980.03	1,048.64
<b>TOTAL</b>	<b>20,707.50</b>	<b>21,877.03</b>	<b>23,128.42</b>	<b>24,467.41</b>	<b>25,900.12</b>
<b>Ventas</b>					
Sueldos y prestaciones ventas	8,107.50	8,675.03	9,282.28	9,932.04	10,627.28
Fletes y gastos de ventas	507,740.49	543,282.33	581,312.09	622,003.94	665,544.21
<b>TOTAL</b>	<b>515,847.99</b>	<b>551,957.35</b>	<b>590,594.37</b>	<b>631,935.97</b>	<b>676,171.49</b>
<b>TOTAL</b>	<b>586,172.89</b>	<b>625,914.71</b>	<b>668,438.47</b>	<b>713,938.89</b>	<b>773,251.61</b>

**Tabla 18. Costos variables de fabricación**

<b>Materia Prima</b>	<b>cantidad (t)</b>	<b>Costo Unitario (Q/t)</b>	<b>Costo total (Q)</b>
Mineral de Hierro requerido (1 año)	2,261.11	264	
Ácido Sulfúrico requerido (1 año)	1,876.82	975	
<b>TOTAL ANUAL</b>			<b>2,426,833.87</b>
<b>Material de empaque</b>	<b>unidades</b>	<b>Costo Unitario (Q/u)</b>	<b>Costo total (Q)</b>
Sacos de 50 kg	83,478.21	2.43	
<b>TOTAL ANUAL</b>			<b>202,852.05</b>
<b>Mano de obra directa</b>			<b>Costo total (Q)</b>
Tipo de operario	especializado		
Cantidad de operarios	2 trabajadores		
Salario correspondiente	1,500.00	Q/mes	
<b>TOTAL PLANILLA</b>	<b>3,000.00</b>		
Prestaciones	1,234.80		
Mano de obra molienda	47,106.52		
<b>TOTAL MENSUAL</b>			<b>51,341.32</b>
<b>TOTAL ANUAL</b>			<b>616,095.84</b>
<b>COSTO PRIMO DIRECTO</b>			<b>3,245,781.76</b>
<b>Materiales / Insumos</b>	<b>Q/pipa</b>	<b>(pipa/año)</b>	<b>Costo total (Q)</b>
Agua	150	376.85	<b>56,527.50</b>
<b>Diesel y energía eléctrica</b>	<b>(Q/kW-h)</b>	<b>Potencia</b>	<b>Costo total (Q)</b>
Reacción y granulación	1.4	26.12	<b>70,210.56</b>
Molienda	1.4	0.35	<b>1,107,945.44</b>
<b>Desperdicios</b>			<b>Costo total (Q)</b>
<b>TOTAL ANUAL</b>			<b>12,416.81</b>
<b>COSTOS DE FABRICACIÓN VARIABLES</b>			<b>4,492,882.06</b>

**Tabla 19. Cálculo de costo unitario**

<b>Elementos de costo</b>	<b>Q</b>
<b>Costo directo</b>	
Materia prima directa	2,426,833.87
Mano de obra directa	616,095.84
Material de empaque	202,852.05
<b>Total</b>	<b>3,245,781.76</b>
<b>Costo indirecto</b>	
Consumo energía eléctrica	70,210.56
Insumos de fabricación	56,527.50
Pérdidas por desecho	12,416.81
<b>Total</b>	<b>139,154.87</b>
<b>Costo total</b>	
<b>Costo total de fabricación</b>	<b>3,384,936.62</b>
Total producto terminado	3,456.00
<b>COSTO UNITARIO DE FABRICACIÓN</b>	<b>979.44</b>

**Tabla 20. Cálculo de precio de venta**

Producción máxima (Tm/año) *a partir de 1.8 Tm/h	3494.40				
	año 1 (Q)	año 2 (Q)	año 3 (Q)	año 4 (Q)	año 5 (Q)
Nivel de producción	50%	50%	75%	90%	90%
Cantidad de producción (Tm/año)	1747.2	1747.2	2620.8	3144.96	3144.96
Cantidad de producción (sacos/año)	34,944	34,944	52,416	62,899	62,899
Costo variable de fabricación	1,711,273.51	1,711,273.51	2,566,910.27	3,080,292.33	3,080,292.33
Costos fijos	49,617.39	52,080.34	54,715.68	57,535.51	773,251.61
Gastos fijos	20,707.50	21,877.03	23,128.42	24,467.41	25,900.12
Fletes y gastos de venta	515,847.99	551,957.35	590,594.37	631,935.97	676,171.49
<b>Total costo</b>	<b>2,297,446.40</b>	<b>2,337,188.23</b>	<b>3,235,348.74</b>	<b>3,794,231.21</b>	<b>4,555,615.56</b>
<b>Costo unitario (Q/Tm)</b>	<b>1,314.93</b>	<b>1,337.68</b>	<b>1,234.49</b>	<b>1,206.45</b>	<b>1,448.54</b>
<b>Costo unitario (Q/sacos)</b>	<b>65.75</b>	<b>66.88</b>	<b>61.72</b>	<b>60.32</b>	<b>72.43</b>
<b>Gastos financieros</b>					
Gastos financieros unitario	157.79	160.52	148.14	144.77	173.83
<b>Total costo</b>	<b>2,573,139.97</b>	<b>2,617,650.82</b>	<b>3,623,590.59</b>	<b>4,249,538.96</b>	<b>5,102,289.42</b>
Total costo unitario (Q/Tm)	1,472.72	1,498.20	1,382.63	1,351.22	1,622.37
Total costo unitario (Q/sacos)	73.64	74.91	69.13	67.56	81.12
<b>Margen de ganancia</b>					
Margen de ganancia	20%	30%	40%	50%	60%
Ganancia total (Q)	294.54	449.46	553.05	675.61	973.42
Ganancia unitaria (Q/saco)	14.73	22.47	27.65	33.78	48.67
<b>Precio de venta</b>					
<b>Precio de venta unitario (Q/Tm)</b>	<b>1,767.27</b>	<b>1,947.66</b>	<b>1,935.68</b>	<b>2,026.83</b>	<b>2,595.79</b>
<b>Precio de venta unitario (Q/saco)</b>	<b>88.36</b>	<b>97.38</b>	<b>96.78</b>	<b>101.34</b>	<b>129.79</b>
<b>Total ventas</b>	<b>3,087,767.96</b>	<b>3,402,946.06</b>	<b>5,073,026.83</b>	<b>6,374,308.44</b>	<b>8,163,663.08</b>

**Tabla 21. Cálculo de amortizaciones sobre el equipo adquirido y gastos diferidos**

Concepto	Inversión (Q)	Años	% Depreciación anual	cuota anual por 10 años (Q)
Edificios e infraestructura	-	20	0	-
Maquinaria y equipo	555,095.94	10	10%	55,509.59
Instalaciones	166,528.78	10	10%	16,652.88
Vehículos	-	3	0%	-
Mobiliario y equipo de oficina	-	5	0%	-
<b>TOTAL</b>				<b>72,162.47</b>

**Tabla 22. Cálculo de pagos anuales al banco**

Deuda inicial	798,787.20					
Intereses (i) =	12%					
n =	5					
	año 1 (Q)	año 2 (Q)	año 3 (Q)	año 4 (Q)	año 5 (Q)	Total
<b>Anualidad</b>	<b>221,591.34</b>	<b>221,591.34</b>	<b>221,591.34</b>	<b>221,591.34</b>	<b>221,591.34</b>	<b>221,591.34</b>
Saldo después de pago	673,050.32	532,225.01	374,500.67	197,849.41	0.00	(221,591.34)
Intereses pagados	95,854.46	80,766.04	63,867.00	44,940.08	23,741.93	0.00
Capital abonado	125,736.88	140,825.30	157,724.34	176,651.26	197,849.41	221,591.34

**Tabla 23. Flujo de caja y análisis de rentabilidad**

	inicial Q.	año 1 Q.	año 2 Q.	año 3 Q.	año 4 Q.	año 5 Q.
<b>Ingresos</b>						
Bancos		798,787.20				
Capital de trabajo	1,693,018.32					
Ventas		3,087,767.96	3,402,946.06	5,073,026.83	6,374,308.44	8,163,663.08
<b>Total ingresos</b>		<b>3,886,555.16</b>	<b>3,402,946.06</b>	<b>5,073,026.83</b>	<b>6,374,308.44</b>	<b>8,163,663.08</b>
<b>Egresos</b>						
Equipo		72,162.47	0	0	0	0
Costos fijos de fabricación		586,172.89	625,914.71	668,438.47	713,938.89	773,251.61
Costos variables de fabricación		1,711,273.51	1,711,273.51	2,566,910.27	3,080,292.33	3,080,292.33
Anualidades e intereses bancarios		221,591.34	221,591.34	221,591.34	221,591.34	221,591.34
<b>Total egresos</b>		<b>2,591,200.22</b>	<b>2,558,779.57</b>	<b>3,456,940.08</b>	<b>4,015,822.56</b>	<b>4,075,135.28</b>
<b>Utilidades</b>						
<b>Utilidad bruta</b>		<b>1,295,354.94</b>	<b>844,166.49</b>	<b>1,616,086.74</b>	<b>2,358,485.88</b>	<b>4,088,527.79</b>
Impuestos		388,606.48	253,249.95	484,826.02	707,545.77	1,226,558.34
depreciaciones		72,162.47	72,162.47	72,162.47	72,162.47	72,162.47
<b>Utilidad neta</b>		<b>906,748.46</b>	<b>590,916.54</b>	<b>1,131,260.72</b>	<b>1,650,940.12</b>	<b>2,861,969.46</b>
Dividendos		15%	30%	35%	40%	50%
<b>Total utilidad neta (nuevo capital de trabajo)</b>		<b>770,736.19</b>	<b>413,641.58</b>	<b>735,319.47</b>	<b>990,564.07</b>	<b>1,430,984.73</b>
<b>Flujo de caja</b>						
Flujo de caja	(1,693,018.32)	770,736.19	413,641.58	735,319.47	990,564.07	1,430,984.73
Flujo de caja acumulativo	(1,693,018.32)	(922,282.12)	(508,640.54)	226,678.92	1,217,242.99	2,648,227.72

