

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ciencias y Humanidades

**DISEÑO DE UNA LÍNEA
PARA LA PRODUCCIÓN DE SULFATO FÉRRICO**

SUSANA E. GONZÁLEZ LEÓN

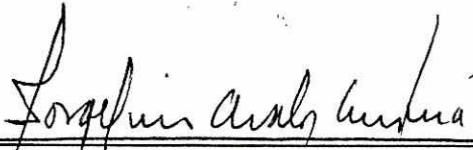


*Trabajo de graduación presentado para optar
al grado académico de Licenciatura en Ingeniería Química.*

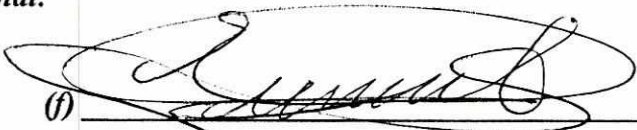
Guatemala

1995

Vo. Bo.:

(f) 
Ingeniero Jorge Luis Avalos
Asesor

Tribunal:

(f) 
Ingeniero José Eduardo Calderón

(f) 
Licenciado Roberto de León Fajardo

(f) 
Ingeniero Juan José Lira Prera

Fecha de aprobación: 31 Octubre de 1995.

CONTENIDO

	Páginas
RESUMEN	
I. INTRODUCCIÓN	02
II. ANTECEDENTES	03
III. JUSTIFICACIÓN	28
IV. OBJETIVOS	29
V. PROBLEMA A RESOLVER	30
VI. METODOLOGÍA	31
VII. RESULTADOS	32
VIII. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	39
IX. CONCLUSIONES	46
X. RECOMENDACIONES	47
XI. BIBLIOGRAFÍA	48
ANEXOS	
A. Reacción	51
B. Análisis del mineral de hierro	51
C. Cálculos Teóricos	51
D. Rendimiento promedio esperado de la reacción	52
E. Análisis de Costos	53

LISTA DE TABLAS Y GRÁFICAS

Tabla	Página
1 Análisis químico típico de Sulfato Férrico	03
2 Datos de la viscosidad del líquido a diferentes temperaturas	14
3 Datos de solución del sulfato férrico	14
4 Detalle y especificación de equipo para el proceso	34
5 Costos fijos y variables del proceso de sulfato férrico	36
6 Otros datos del proceso	36
7 Análisis del porcentaje de hierro en mineral	51
8. Porcentaje de Sulfato Férrico anhidro en el producto de la reacción	52
9 Costos del equipo	53
10 Materia prima	54
11 Requerimiento energético	54
12 Requerimiento de combustible en el horno	54
Figura	Página
1 Comparación de los rangos de coagulación e insolubilidad del hidróxido férrico y de aluminio	13
2 Tasa de disolución del Sulfato Férrico a 15°C	13
3 Diagrama de un proceso para la fabricación de Sulfato Férrico	18
4 Diagrama de flujo del proceso	35
5 Diagrama de planta del proceso	38

RESUMEN

El siguiente trabajo presenta el diseño de una línea para la producción de sulfato férrico normal anhidro de granulado uniforme y completamente soluble en el agua, a partir de mineral de hierro nacional.

Uno de los principales usos del sulfato férrico en soluciones acuosas, depende de su habilidad de coagulación en un rango amplio de valores de pH, formando así hidróxido férrico, que es capaz de atrapar material suspendido presente en el medio acuoso, para su remoción. Un parámetro de calidad muy importante en el producto deseado, es el bajo porcentaje de insolubles al estar éste en solución acuosa. Es por ello, que este proceso tiene como resultado un producto con bajo porcentaje de insolubles.

La selección de este proceso se basó en un estudio de las alternativas conocidas más viables, tomándose en cuenta la disponibilidad tanto de materia prima, como del equipo, así como de los costos involucrados.

El proceso consiste en hacer reaccionar mineral de hierro molido en suspensión, con ácido sulfúrico, para formar una solución de sulfato férrico. Esta solución es posteriormente peletizada para formar gránulos de sulfato férrico hidratado que luego son calcinados para su deshidratación. El producto es tamizado para obtener un producto anhidro, uniforme y con bajo porcentaje de insolubles.

El proceso presenta bajos requerimientos energéticos y se cuenta con parte del equipo, lo que reduce la inversión adicional necesaria.

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la industria de explotación de minerales y de los productos del procesamiento de los mismos está desarrollándose en nuestro país. Es por esto que en el siguiente trabajo se presenta la selección de un proceso para la elaboración de sulfato férrico a partir de óxido férrico y el diseño respectivo de la línea de producción. Tanto la selección como el diseño se basó en un análisis de lo que ha sido la producción de sulfato férrico a nivel mundial, lo que permitió la selección de la alternativa más viable, tomándose en cuenta las condiciones de trabajo correspondientes al medio guatemalteco para que el proyecto resulte factible.

Se consideran aspectos de materia prima, equipo necesario en el proceso y condiciones de operación del mismo, tomando en cuenta disponibilidad y economía. El diseño incluye el desarrollo y detalle de la ingeniería básica del proceso seleccionado, así como parámetros de trabajo del proceso, descripción y especificación del equipo, condiciones de operación, etc. Finalmente se discute la eficiencia esperada del proceso y algunos detalles a considerar durante la puesta en marcha del proyecto.

II. ANTECEDENTES

El sulfato férrico es una sal de hierro(III) trivalente, cuya fórmula molecular es $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ y puede elaborarse en fase sólida (forma seca) y en fase líquida. La forma seca es levemente higroscópica con la fórmula $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$, en donde x es aproximadamente 5. Análisis típicos de la forma seca y líquida se muestran en la Tabla No.1, junto con los estándares de la AWWA¹ para la forma seca (1).

TABLA No. 1.1 Análisis químico típico de Sulfato Férrico.

	Líquido	Estándar AWWA	
		Seco	B406
Sulfato Férrico			
forma seca			
Hierro soluble en agua expresado como Fe	10.4%	20.8%	-----
Fe^{+++} soluble en agua	10.0%	20.0%	18.0%Mínimo
Fe^{++} soluble en agua	0.4%	0.8%	3.0%Máximo
Total de insolubles	<0.1%	5.0%	6.0%Máximo
Ácido libre	1.0%	2.0%	4.0%Máximo
Humedad @105°C.	---	2.0%	-----

(1)

Los coagulantes férricos han sido muy utilizados industrialmente por tener varias ventajas sobre otros coagulantes de uso común. La distinción entre el sulfato férrico y otros coagulantes ferrosos, es el hecho de que contiene hierro trivalente, Fe^{+++} . Esto le da propiedades totalmente diferentes a las de las sales ferrosas, sin embargo, a veces son clasificados juntos por libros antiguos, como sulfato de hierro (1).

¹AWWA: American Water Works Association.

Durante el proceso de elaboración del sulfato férrico, el grado de hidratación (agua de cristalización) es controlado cuidadosamente para fijar el contenido de hierro trivalente. El sulfato férrico anhidro es parcialmente soluble y forma una gel al dispersarse en agua.

Con este proceso se obtiene un producto de poco volumen, alto contenido férrico y de bajo costo en flete y manejo (1).

El sulfato férrico seco puede ser alimentado a un proceso por cualquier alimentador tipo estándar en uso. Puede ser necesario realizar mínimas modificaciones al tanque de solución y a las líneas. Por ejemplo, tuberías y accesorios de hierro y bronce deberán ser reemplazadas por otras de plástico o material resistente a la corrosión (1).

Debido a un control de calidad cuidadoso durante la producción, el sulfato férrico puede ser almacenado casi indefinidamente sin que presente degradación química o pérdida de su fuerza coagulante. Sin embargo, esto no debe justificar poca rotación del producto almacenado (1).

El sulfato férrico seco se almacena bien en silos diseñados apropiadamente y ha sido manejado por lotes o bultos de diferentes proporciones según las necesidades o requerimientos del usuario. El embarque de estos lotes o bultos reduce el costo de manejo y material (1).

El sulfato férrico seco puede manipularse en carros con tolva o camiones neumáticos. Se empaca en bolsas de 25 Kg. y 50 Kg., y tambos de fibra de diferente capacidad. El sulfato férrico líquido, como una suspensión al 50% en agua, puede ser embarcado en camiones tanque de acero inoxidable y en tambos plásticos de 200 litros (1).

A. Ventajas del sulfato férrico como coagulante

El sulfato férrico es un coagulante efectivo sobre un rango amplio de pH², lo cual ha sido demostrado en plantas de tratamiento de agua que usan sulfato férrico en un rango extremo de pH. El color orgánico es removido a bajos pH, y la coagulación en agua suavizada es llevada a cabo sobre pH 10. La tolerancia al pH es extremadamente extremo de pH. El color orgánico es removido a bajos pH, y la coagulación en agua suavizada es llevada a cabo sobre pH 10. La tolerancia al pH es extremadamente importante en la aplicación de la precipitación por pH de contaminantes, tales como manganeso, cobre y cromo (1).

Con el uso de sulfato férrico en el tratamiento de agua, la rapidez de coagulación y floculación subsecuente es excepcionalmente alta y las características de sedimentación resultantes son buenas, debido al flóculo de alta densidad formado.

La dosis administrada de sulfato férrico es baja y usualmente es mucho menor que la dosis óptima para una excelente coagulación y floculación en el tratamiento de agua. Esto es de gran importancia, ya que la turbidez del agua cruda fluctúa rápidamente (1).

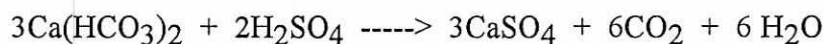
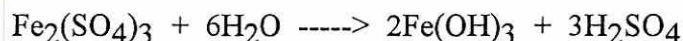
Algas y otras partículas que obstruyen los filtros son efectivamente coaguladas . Esta cualidad, junto con las excelentes características del flóculo, generalmente resulta en un incremento marcado en la vida útil del filtro (1).

Pueden producirse afluentes que son bajos en hierro y aluminio, lo que es de extrema importancia en industrias como la de papel, teñido de textiles, hilado de rayón o donde la formación de un flóculo posterior o silicato de aluminio no pueden ser toleradas en lugares como hervidores, unidades de intercambio iónico y de acondicionamiento de aire (1).

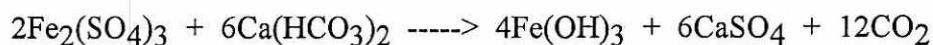
²pH: Logaritmo negativo (de base 10) de la concentración de H⁺(ac); $\text{pH} = -\log [\text{H}^+]$. Así que la concentración de [H⁺](ac) en solución se puede expresar en términos de la escala de pH que va de pH 1 a pH 14 en donde los pH bajos indican acidez y los altos alcalinidad, siendo el pH neutro 7.

B. Química y física de la coagulación y floculación del sulfato férrico en el tratamiento de agua

Las siguientes reacciones químicas ocurren en segundos, luego que el hierro trivalente soluble es agregado al agua cruda con cierta dureza³, de ahí el $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ de la segunda reacción:



Mediante estas reacciones se puede ver claramente el curso de la coagulación química que dicta la calidad del agua producida. El sulfato férrico es muy soluble en agua haciendo que el hierro trivalente, Fe^{+++} , disponible para las reacciones anteriores, transforme al coagulante en hidróxido férrico:



Para que el coagulante sea efectivo éste debe tornarse insoluble durante la reacción y mantenerse así. El sulfato férrico es un coagulante efectivo sobre el rango completo de pH y es normalmente encontrado en el tratamiento de agua como hidróxido férrico, el cual es formado a partir del sulfato férrico como lo muestra la reacción anterior, siendo insoluble y permaneciendo así en el rango de pH 5.5-11.5, como se muestra en la Figura No. 1. Esta estabilidad es una de las grandes ventajas que presenta el sulfato férrico sobre otros coagulantes como el sulfato de aluminio (1).

El hidróxido de aluminio formado por la reacción del sulfato de aluminio y agua cruda actúa en un rango de pH mucho más estrecho que el hidróxido férrico producido por la

³**Dureza:** Condición del agua causada principalmente por iones metálicos divalentes, (calcio y magnesio). Esta es una medida que va de: Agua Suave -0 a 75 mg/L., Moderada -75 a 150 mg/L., Dura -150 a 300 mg/L. a Muy Dura -sobre 300 mg/L.

misma reacción, ya que el aluminio produce un hidróxido anfotérico⁴. En la práctica actual al usar sulfato de aluminio, se ha encontrado necesario mantener la dosis del sulfato de aluminio en un pH de ± 0.2 del punto isoeléctrico⁵, para asegurar una coagulación y floculación aceptable y así reducir el aluminio soluble en el agua producida (1).

La coagulación involucra esencialmente química coloidal y de superficie. Cuando la masa de turbidez en un volumen de agua de alta turbidez se determina, esta masa es relativamente insignificante comparada a la masa del agua.

Toda partícula coloidal está cargada eléctricamente ya sea positiva o negativamente, y la magnitud de la carga varía dependiendo de la naturaleza del material y sus alrededores. El agua cruda contiene usualmente partículas de turbidez cargadas negativamente. Debido a que la carga varía de acuerdo a las condiciones de los alrededores, se puede ejercer control sobre la carga al cambiar las condiciones (1).

Coloides estables pueden mantenerse indefinidamente suspendidos, ya que cargas iguales se repelen y las partículas no pueden acercarse lo suficiente para aglomerarse. La masa real de las partículas es tan pequeña comparada con la carga y el área de superficie, que la gravedad no tiene efecto hasta que algo causa la reducción en la carga para que las partículas puedan aglomerarse y aumentar así su masa (1).

El hierro trivalente y el aluminio son iones en solución cargados positivamente y sus hidróxidos pueden ser precipitados como coloides cargados positivamente. Bajo condiciones apropiadas estos coloides precipitados permiten la coagulación (1).

Ya que el coagulante es dosificado en cantidades relativamente bajas, es deseable que todo el hidróxido metálico formado durante la dosificación se precipite y permanezca

⁴**Hidróxido Anfotérico:** Hidróxido de ciertos elementos, incluyendo aluminio, zinc, cromo y otros, que son tanto solubles en ácidos y bases.

⁵**Punto Isoeléctrico:** Punto en que diferentes iones tienen la misma carga.

insoluble. Debido al amplio rango de efectividad de pH del sulfato férrico, este criterio no presenta un interés práctico a considerar su uso como coagulante. Una dosis suficiente de sulfato férrico al pH respecto de su punto isoeléctrico, podría ser una dosis menor a la necesaria para un pH menor o mayor al utilizar sulfato de aluminio, debido al estrecho rango de efectividad de pH para el sulfato de aluminio (1).

La formación de un macroflóculo inicial durante la coagulación indica que empieza el proceso de floculación. Aunque la carga de la partícula continúa tomando parte, su efecto es disminuido proporcionalmente con el aumento en tamaño del macroflóculo aglomerado (1).

Los productos de la precipitación inicial, principalmente hidróxido férrico, cuando se usa sulfato férrico, y la turbidez aglomerada, son conocidos como macroflóculo, que tiene un gran área de superficie aunque menor que el coloide original. El macroflóculo es el segundo paso más importante durante la clarificación de agua turbia. Fenómenos tales como la co-precipitación, adsorción y absorción de contaminantes, también ocurren en esta etapa, involucrando el mecanismo de atrapado mecánico de toda partícula material, tan esencial en la clarificación de agua (1).

Mientras el macroflóculo crece invisible al ojo convirtiéndose en un flóculo, el trabajo esencial del coagulante ha terminado. La turbidez coloidal, color, contaminantes precipitados, virus, bacterias y algas deben estar atrapadas en el flóculo. Las características de diseño de la planta de tratamiento deben ser tales, que el flóculo continúe su crecimiento hasta un tamaño y densidad que permita que la gravedad sobrepase la fuerza de la corriente de agua, permitiendo así que el flóculo se asiente antes de alcanzar el filtro (1).

Durante la etapa de formación del macroflóculo, mientras el área de superficie es aún grande, es esencial que el hidróxido metálico precipitado permanezca insoluble el mayor tiempo posible, para evitar que gran parte de lo que ha sido atrapado en el flóculo sea

liberado. También es necesario que el proceso de formación del floculo continúe rápidamente para evitar que parte del floculo o de la turbidez lleguen a alcanzar los filtros, causando una disminución en la vida útil de los filtros y posible turbidez en el agua producida (1).

El sulfato férrico cumple con estos requerimientos permitiendo un rápido desarrollo del macrofloculo estable y un floculo denso de rápida precipitación (1).

C. Tratamiento de Agua

Las técnicas de tratamiento de agua, mediante el uso del sulfato férrico como coagulante, contemplan lo siguiente: remoción de la turbidez, suavizamiento con cal o por intercambio iónico, estabilización del agua, control de manganeso en el agua, disposición de los lodos de tratamiento, ósmosis reversible (RO) y procedimientos de laboratorio para pruebas de agua como prueba de jarras⁶ (1).

El sulfato férrico presenta una amplia tolerancia a cambios de turbidez. Esto debe ser usado como un factor de seguridad y nunca como excusa para una operación deficiente. El sulfato férrico es uno de los coagulantes disponibles más eficientes debido a su tolerancia a altos pH y amplia tolerancia a cambios de turbidez. Por sus bajas dosis requeridas, el pH y la dureza no carbonatada del agua a tratar no son afectados considerablemente. Pruebas de jarras comparativas son un excelente ejemplo de la gran eficiencia del sulfato férrico sobre coagulantes de aluminio y sintéticos (1).

⁶**Prueba de Jarras:** Existen varias opiniones sobre el procedimiento apropiado para realizar una prueba de jarras. Aquí se trata de un proceso en que se utiliza agua cruda in situ para mantener las condiciones propias del lugar, en la planta. El objeto de esta prueba es de duplicar lo mas posible el proceso químico dinámico y mecánico del agua de la planta bajo condiciones controladas de laboratorio. Con esto se estudian los efectos de diferentes variables en la formación del floculo y la calidad del agua en un tiempo mínimo sin tanto desperdicio y posible peligro mediante operaciones de prueba y error en una planta de tratamiento de agua.

El uso de sulfato férrico en coagulación, previo al suavizamiento por intercambio iónico, es de gran importancia con aguas de superficie y aguas de pozo con alta cantidad de hierro y manganeso. Ya que el hierro trivalente se mantiene insoluble no causa problemas como un transportador de cationes solubles que puede incrementar los costos de regeneración, además que requiere mayores tiempos de compensación (1).

La disposición de los lodos resultantes del tratamiento de agua, en donde los sólidos no pueden ser retornados al agua de superficie, es de gran importancia. Todas las industrias enfrentan problemas de contaminación incluyendo las industrias de tratamiento de agua (1).

Un coagulante, no importando cuál sea el utilizado, agrega un pequeño porcentaje a la masa de los lodos resultantes del tratamiento de agua. Lo importante es que el coagulante permanezca efectivo, aunque el lodo sea reservado para una subsiguiente concentración, secado y disposición. La habilidad del floculo de hierro para reformarse, inclusive luego de ser sometido a las condiciones más severas de manejo, lo hace atractivo. El lodo que se mueve de un tanque o clarificador por gravedad o bombeo, sufre condiciones severas de manejo (1).

D. Uso del sulfato férrico

1. Materiales de construcción, ingeniería y diseño

Los principios básicos que se aplican al manejo de otros coagulantes también se aplican al utilizar sulfato férrico (1).

Por ser el sulfato férrico una sal ácida, se debe usar materiales resistentes a la corrosión en el pequeño espacio en que se maneje este floculante en cantidad concentrada. Algunos materiales adecuados son: Plásticos (incluyendo PVC), polietileno, plásticos reforzados con fibra de vidrio, casi todos los hules, plomo, acero inoxidable 316, vidrio y cerámicas. Se considera como materiales inadecuados los siguientes: cobre, aleaciones de cobre, acero ligero o acero galvanizado.

Como en todos los coagulantes de sales ácidas, no sólo sulfato férrico, se debe tener cuidado en la selección de materiales de construcción para los tanques de disolución, tanques de almacenamiento, líneas de solución, grifos, acoplamientos, bombas, etc. (1).

El sulfato férrico en forma seca no es corrosivo. Una vez que se agrega la solución concentrada de sulfato férrico al agua cruda o de desecho, la hidrólisis a hidróxido férrico hace que cualquier corrosión por sulfato férrico se considere despreciable (1).

El sulfato férrico en forma seca es un polvo de fluidez libre, se mantiene estable al transcurrir el tiempo y es ligeramente higroscópico. Sin embargo, exponer el sulfato férrico a humedades extremadamente altas no resulta conveniente. Es por esto que en situaciones donde se espera alta humedad se recomienda suministrar calor o aire seco (1).

El almacenamiento de producto seco a granel se justifica dependiendo de la inversión de capital que el tonelaje represente, ya que el sulfato férrico cuenta con una densidad a granel de 0.90 a 0.96 Kg. por litro (56 a 60 libras por pie cúbico). Las tolvas o silos de almacenamiento a granel deben tener una pendiente mínima de 36° en su descarga (que es un gran ángulo), sin embargo, se sugieren hasta 60° (1).

Al almacenar en silos casi cualquier material seco, es recomendable proveer un método auxiliar de asistencia que permita flujo constante en caso de que ocurra endurecimiento del material por cualquier razón, como por ejemplo, en silos que no han sido utilizados por algún tiempo o si se da segregación del material en el silo. En algunos casos un simple vibrador adecuadamente ajustado, es suficiente. Aun mejor, pero más costosos, son los silos con descarga inferior activa y sopladores de aire para facilitar la descarga (1).

La mayoría de los sistemas de transporte de sólidos han sido usados para transportar el sulfato férrico. La práctica ha mostrado que pueden utilizarse sistemas neumáticos de vacío apropiadamente diseñados, tornillos y elevadores de cubeta, sin presentar problemas

de operación. Sin embargo, cualquier sistema seleccionado debe contar en su diseño con platos de acceso fácilmente removibles para limpieza (1).

Asumiendo que la corrosión por sulfato férrico no es un factor considerable, cualquier material de construcción puede ser usado para construir los silos de almacenamiento. La madera no es utilizada normalmente, a menos que sea apropiadamente recubierta, debido a su posible suavizamiento y desgaste después de unos años. Por años se han usado silos de concreto, pero estos deben ser resistentes al agua para que la humedad no penetre el concreto a través de una pared expuesta a un clima húmedo. El acero es el más comúnmente usado para su fabricación (1).

En algunos casos el sulfato férrico es despachado seco a granel, para ser posteriormente puesto en solución por lotes, en procesos que así lo requieran. Esto tiene la ventaja que disminuye el costo de embarque sobre el manejo de líquido, debido a que disminuye el volumen y peso del agua de la solución (1).

El sulfato férrico es usado en plantas que usan filtros de todo tipo, incluyendo filtros de arena con capa de antracita y filtros que soportan un alto caudal (1).

2. Datos Físicos

El sulfato férrico es utilizado para coagulantes de fórmula $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$, en donde x es aproximadamente 5. El sulfato férrico normalmente tiene dos estructuras cristalinas: $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ (anhidro) y $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$. La forma anhidra no es muy soluble en agua fría y su solubilidad aumenta al incrementar la temperatura del agua. El $9\text{H}_2\text{O}$ de la forma cristalina hace que esta sea muy soluble en agua (1).

La velocidad de disolución del sulfato férrico es muy rápida al inicio. Alrededor del 90% del sulfato férrico seco se disuelve en unos 8 minutos a 15°C . Luego de este período, la velocidad de disolución baja, alrededor del 95% se disuelve luego de 30 minutos y el 97-

Figura No. 1
Comparación de los rangos de coagulación e insolubilidad
del hidróxido férrico y de aluminio

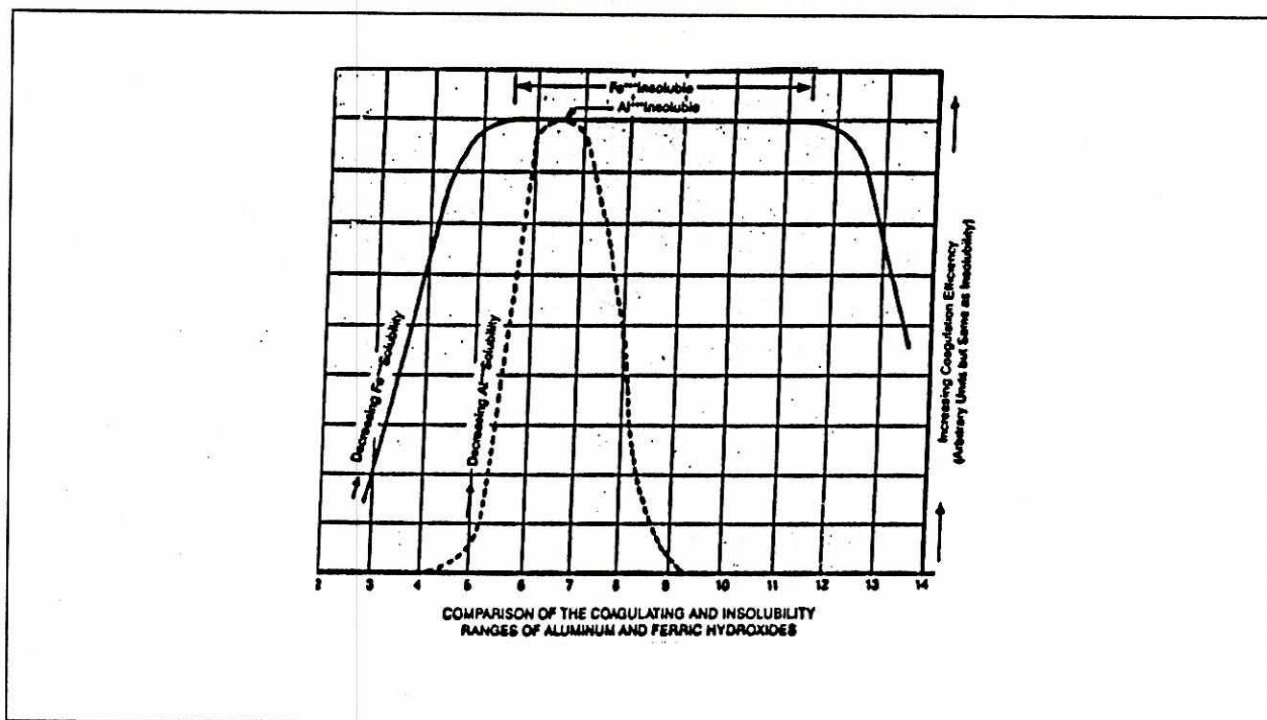
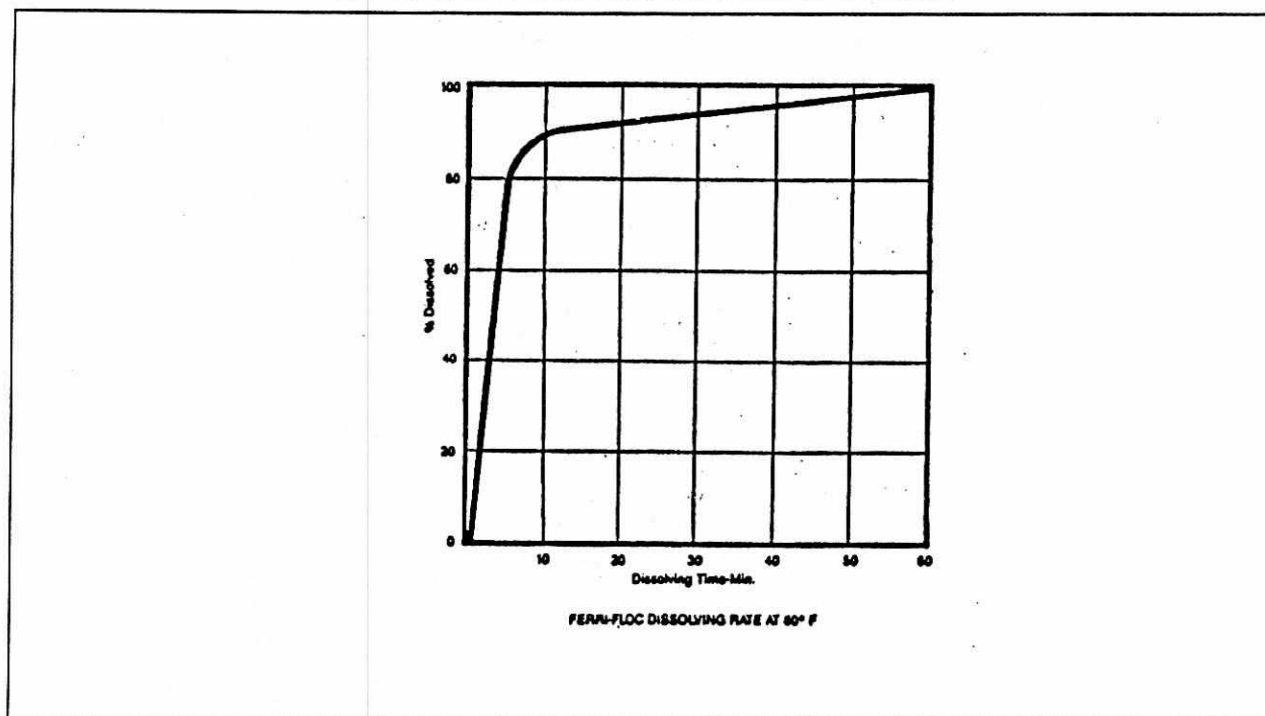


Figura No.2
Tasa de disolución del Sulfato Férrico a 15⁰C



La gravedad específica del sulfato férrico líquido al 50% es de 1.46-1.48 y tiene una viscosidad a diferentes temperaturas de:

TABLA No. 2 Datos de la viscosidad del líquido a diferentes temperaturas

Temperatura	Viscosidad en centipoises
20°C	24
10°C	38
0°C	64

TABLA No. 3 Datos de solución del sulfato férrico

G.Esp.	Peso/Gal. Lbs.	% peso de F(SO ₄) ₃ seco	Lbs. Fe ₂ (SO ₄) ₃ seco Por galón	Gal. agua para hacer Soln. de un Gal.
1.00	8.34	0	0	----
1.05	8.76	7.0	0.61	0.98
1.10	9.17	13.0	1.19	0.96
1.15	9.59	18.8	1.80	0.93
1.20	10.01	24.2	2.42	0.91
1.25	10.43	29.2	3.05	0.89
1.30	10.84	33.9	3.68	0.86
1.35	11.26	38.4	4.32	0.83
1.40	11.68	42.8	5.00	0.80
1.45	12.09	47.0	5.68	0.77
1.48	12.34	50.0	6.17	0.74
1.50	12.51	51.7	6.47	0.72

Fuente: (1).

99% después de 60 minutos. Cambios relativamente pequeños en la temperatura de disolución de 15°C no afectan considerablemente la velocidad de disolución. A 38°C la velocidad es de 2-3% más rápida que a 15°C y a 5°C la velocidad es de 2-3% más lenta que a 15°C . En la Figura No.2 se ve la velocidad de disolución versus el tiempo a 15°C (1).

El sulfato férrico líquido no cristaliza hasta temperaturas bajo -32°C y mientras su temperatura baja, se va tornando grueso y viscoso. Así, el sulfato férrico es estable como una solución espesa por unas 72 horas a -32°C (1).

Soluciones estables pueden ser formadas a partir del sulfato férrico seco tomando en cuenta el pH de la solución, ya que el sulfato férrico se puede hidrolizar a pHs relativamente bajos. Para estabilidad, la solución debe ser tal que el pH no sea menor que unos 2.0 (1).

Debido a que el sulfato férrico generalmente contiene entre 5-6% en peso de óxidos finos de hierro insolubles en agua, las soluciones hechas del material seco son conservadas adecuadamente con agitación continua para que el material insoluble se mantenga en suspensión y así descargue con los sólidos del proceso (1).

Como es el caso usual al hacer suspensiones, existe un aumento de volumen cuando se disuelve el sulfato férrico en agua, lo cual es de particular significado cuando se involucran soluciones fuertes. Por ejemplo, una solución de casi el 50% exacto puede ser hecha al agregar 136.36 Kg. (300 libras) de sulfato férrico a 36 galones de agua. El volumen final es 48 galones representando un incremento en volumen del $33 \frac{1}{3} \%$ (1).

Con el sulfato férrico hay un calor de disolución positivo, lo que hace que la cantidad de calor generado al hacer una solución al 50% cause un aumento de $2-3^{\circ}\text{C}$ en la temperatura (1).

La concentración de las soluciones de sulfato férrico, expresada como porcentaje en peso de sulfato férrico, junto con las libras de sulfato férrico por galón son mostrados versus la gravedad específica de la solución a 24°C en la Tabla No. 3. La gravedad específica de

una solución fuerte de una concentración determinada varía ligeramente con la temperatura. El factor es 0.00035 unidades de gravedad específica por 17°C . Si la solución está a una temperatura mayor que 24°C y se determina su gravedad específica a esta temperatura mayor, la gravedad específica de la solución como si fuera a 24°C , puede ser determinada al agregar el factor de corrección total al valor obtenido a la temperatura mayor (1).

E. Otros usos del sulfato férrico

1. Agricultura

Varios cultivadores de plantas usan el sulfato férrico como fuente de hierro nutritivo y como un medio controlable de bajar el pH de tierras alcalinas. Es también beneficioso para plantas ácido-amantes, ya que no genera efectos tóxicos que podrían resultar de la adición de aluminio soluble (1).

El sulfato férrico puede ser mezclado con otros materiales fertilizantes para producir un fertilizante ácido, o mezclado con varios diluyentes inertes. El sulfato férrico puede también ser aplicado a la tierra como se vende, sin un mezclado o disolución posterior. Los cultivadores de plantas, como la mora, usualmente aplican unas 227.27 Kg. (500 libras) por cada 0.4046 hectáreas (un acre) en tierras minerales para reducir el pH en una unidad. Esto es aproximadamente 141.75 Gr. (5 onzas) por planta. La aplicación es repetida según sea necesario monitoreando el pH de la tierra, mediante pruebas de pH de la tierra (1).

Los jardineros obtienen un uso satisfactorio de sulfato férrico en azaleas, al esparcir dos o tres cucharadas uniformemente en el suelo bajo el área de las hojas, aunque no en contacto con el tronco. En donde las pruebas de pH de la tierra no resultan prácticas, la aplicación debe ser repetida siempre que la lixiviación lo haga necesario, por ejemplo, cada tres semanas durante la etapa de crecimiento, o luego de cada período de lluvia fuerte (1).

El sulfato férrico es fácilmente mezclado en fertilizantes ácidos especializados o fertilizantes completos, como una fuente excelente de hierro nutritivo y para proveer de acidez a la tierra (1).

El sulfato férrico encuentra aplicación en la manufactura de quelatos conteniendo hierro y fungicidas (1).

2. Otros usos

El sulfato férrico disfruta de un alto uso en decapado de metales. Cuando el sulfato férrico reemplaza al ácido nítrico, en el baño de ácido nítrico-ácido hidrofúorídrico, es igualmente efectivo dando una reducción en el costo, mejor control de pérdida de metal, y el fluoruro férrico formado es no-volátil a temperaturas normales de decapado, incrementando así la seguridad de la planta (1).

El sulfato férrico es usado en procesos de descamado ácido y operaciones de decapado, ya que está totalmente oxidado y no requiere de oxidantes caros como peróxido de hidrógeno, que es normalmente usado con sulfato ferroso (1).

Debido a consideraciones de contaminación de agua, el sulfato férrico es preferido sobre los cromatos, en compuestos metálicos de limpieza. Además de la eliminación de un material altamente tóxico, el sulfato férrico ofrece un valor secundario como coagulante cuando la solución de limpieza llega a la planta de tratamiento de agua (1).

El sulfato férrico es usado en la manufactura de pigmentos y tinta y como colorante de concreto para control luminoso en carreteras y canchas de tenis (1).

F. Procesos de elaboración de Sulfato Férrico

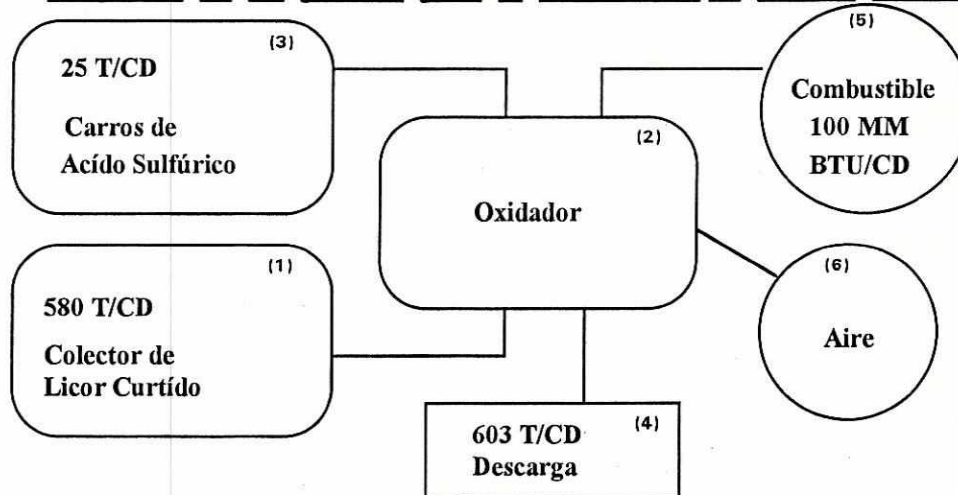
En la actualidad existen en el mundo diferentes procesos de elaboración de sulfato férrico. A continuación se menciona algunos de los procesos utilizados por diferentes empresas.

1. *Proceso para el tratamiento de licor de desecho de decapado:*

En la industria de procesamiento de acero se obtienen grandes cantidades de un licor de decapado que consiste principalmente de sulfato ferroso, ácido sulfúrico y agua. El desecho de este licor se ha convertido en un problema serio para la industria. Este puede ser reprocesado y convertido en productos de valor. El licor es entonces oxidado al estado férrico por la adición de ácido sulfúrico y aire suficiente, para convertir todo el ferroso en férrico. En la práctica actual esto se logra por adición de ácido y luego aireado de la masa caliente hasta que la conversión ocurra.

Figura No. 3

Diagrama de un proceso para la fabricación de Sulfato Férrico



El licor conservado, en este caso consistente de una solución acuosa de 18.8% de sulfato ferroso y 2.0% de ácido sulfúrico, se recoge en un colector (1), ver Figura No.3, en donde los sólidos entrantes se dejan reposar para que precipiten. El afluente clarificado es bombeado a uno de los dos oxidadores (2) a razón de 580 toneladas por día, en donde es mezclado con ácido sulfúrico (25 tons por día) y luego soplados con aire caliente y vapor, hasta que todo el hierro ferroso se haya convertido al estado férrico. El tiempo de reacción es de aproximadamente dos horas y la temperatura es de unos 95°C.(3)

2. *Oxidación por bacteria de compuestos disueltos ferrosos y de vanadio:*

Las soluciones acuosas diluidas de lixiviación que contienen U, Fe como sal ferrosa, y VO₂ en 0.5 g./l. o menos, son oxidados convenientemente y a bajo costo para convertir el Fe a una sal férrica al contactar la solución aireada, a un pH de 1.1-2.8 y 15-40°C, con un poco de bacteria oxidante encontrada en cierta agua de minas de Fe. Estas bacterias están creadas para tolerar U y V en solución, y el contacto se mantiene hasta que la fuerza negativa electromotriz de la solución alcance -0.55v. El hierro férrico puede entonces ser precipitado para purificar la solución, o la acción de la bacteria puede continuarse hasta unos -0.65v. de fuerza electromotriz, a un pH de 0.5-1.5, cuando el V es también oxidado completamente al estado quíntuple, y es precipitado como vanadio férrico. No se reportan tiempos para esta oxidación. La tolerancia de la bacteria para metales en soluciones de lixiviación, debe ser hecha gradualmente a través de varias generaciones o estas morirán sin oxidar. CO₂ y N₂, etc. también deben ser proporcionados para nutrirlas. Estas pueden ser sujetadas en piedras porosas, que deben ser reemplazadas y limpiadas cuando se aglomeran con bacteria y precipitados, o preferentemente en partículas porosas como vermiculita o arena, que son agitadas junto con la solución. Parte de la producción puede ser guardada y usada como inóculo para soluciones futuras a oxidarse, mientras el resto es filtrado para un tratamiento ácido para recuperar un 25% de solución de V₂O₅ (4).

3. Oxidación de compuestos ferrosos y reducción de compuestos férricos continuamente:

Compuestos de Fe²⁺ pueden ser oxidados al estado Fe³⁺ mediante un gas que contiene apreciables cantidades de oxígeno y en algunos casos, el oxígeno puro puede ser usado. Un catalizador del grupo de Pt en un material de soporte inerte, es utilizado en el reactor de columna de goteo para ayudar a la reacción. En un ejemplo típico en que el área de sección transversal del reactor es de 16.6 cm.², la columna de goteo tiene un largo de 20cm. y el catalizador es 3% Pt en gránulos de carbón de 1-3mm. Una conversión del 99% se obtiene usando 100g. de FeSO₄ · 7H₂O y 100 ml. H₂SO₄ conc./l. La tasa de flujo es de 276 ml./hr. Para la reducción se usó H₂ (5).

4. Interacción de óxido férrico con ácido sulfúrico:

El Fe_2O_3 se calienta en varias concentraciones de ácido sulfúrico y en una solución ácida de Zn, en un tubo de cuarzo cerrado, en una corriente de aire seco (70ml/min) de 20-600° C 5-60 min. El Fe_2O_3 libre reacciona ligeramente con ácido sulfúrico conc. (aprox. 1.5-2.5%) a temperatura ambiente. A 100° C la reacción aumenta a 72.5% en los primeros minutos. Aumentando la temperatura entre 200-300° C unidades de temperatura, incrementa el porcentaje reaccionado en sólo 3%. Las curvas obtenidas de porcentaje de reacción vs. temperatura y tiempo indican que a 100, 200, y 300° C hay resistencia difusional al proceso resultante de la formación de grandes cantidades de $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$, durante los primeros minutos de la reacción. A temperaturas mayores de 300° C hay una reducción en el porcentaje reaccionado, esto directamente relacionado a la temperatura. A 560° C esta reducción es menos marcada, probablemente debido al incremento en la volatilidad de ácido sulfúrico. A temperaturas mayores, disociación térmica del $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ empieza y se acelera al incrementar la temperatura. La resistencia difusional también se detecta en este proceso debido a la formación de productos de descomposición. El calcinamiento preliminar de Fe_2O_3 a 500° C no afecta el porcentaje reaccionado con ácido sulfúrico. Fe_2O_3 libre calcinado a 600, 700, y 800° C es pasivo a la acción del ácido sulfúrico. Ya que a estas temperaturas el Fe_2O_3 no sufre cambios polimórficos, es razonable explicar que la baja en el porcentaje reaccionado resulta del recocimiento de los centros activos. En cierto grado, este fenómeno también puede ser explicado por el hecho de que los férritos formados a altas temperaturas, reaccionan con el ácido sulfúrico sólo con dificultad. Una reducción en la concentración del ácido sulfúrico a 60%, reduce el porcentaje reaccionado especialmente a 100 y 150° C. A 200° C se observa sólo durante los primeros 5-15 minutos de la reacción, que puede ser fácilmente explicado por la evaporación acelerada de agua a una temperatura mayor. Al calentar Fe_2O_3 a 150 y 200° C en un electrolito de Zn ácido que contiene 150 g H_2SO_4 /l., durante 60 minutos, el porcentaje reaccionado del Fe_2O_3 es casi independiente

del contenido del ectrólito de Zn; esto se explica por la alta tasa de conversión del Fe a sulfato a estas temperaturas (6).

5. Oxidación catalítica de sulfato de hierro:

Se describe una planta para la producción de $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$, como agente floculante para lodos y aguas de desecho, por oxidación catalítica de FeSO_4 . La planta cuenta con dos lechos sólidos de carbón activado granular, en serie. El H_2SO_4 pasa a través del primer lecho, es mezclado con FeSO_4 , y pasa a través del segundo lecho junto con el aire oxidante. Cuando la eficiencia catalítica del segundo lecho es disminuida, la secuencia del lecho es revertida para regenerar el segundo lecho con el H_2SO_4 inicial (7).

6. Sulfato Férrico:

El FeSO_4 sólido conteniendo de 10-11% de agua de cristalización es calentado en una atmósfera oxidante para formar $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ ácido. A este sólido se le agrega H_2SO_4 en cantidad equivalente o en un pequeño exceso. La mezcla es entonces calentada hasta que se libera el ion sulfato en exceso. Luego, el $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ es producido continuamente a un bajo costo (8).

7. Reacciones termoquímicas de algunos materiales que contienen azufre, durante el calentamiento en oxidación y medios inertes:

El FeS_2 calentado en atmósferas de Ar, se transforman en pirrotita. El calentamiento de pirita y pirrotita en aire conlleva a la formación de FeSO_4 , que es luego convertido a $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$. Resultado de análisis con rayos X y DTA confirman la formación de FeO , Fe_3O_4 , y Fe_2O_3 a $>500^\circ\text{C}$ y su interacción con sulfitos. El calentamiento de $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ en atmósferas oxidantes produce $\text{Fe}(\text{OH})\text{-SO}_4$ y FeSO_4 , que son oxidados a $\text{Fe}_2\text{O}(\text{SO}_4)_2$. El calentamiento de $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ en corrientes de Ar produce FeSO_4 , que es descompuesto a $>520^\circ\text{C}$ con formación de $\text{Fe}_2\text{O}(\text{SO}_4)_2$ y $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$. Los sulfatos férricos forman Fe_2O_3 y SO_3 a $>660^\circ\text{C}$ (9).

8. Sulfato Férrico:

Una mezcla de polvo azul de mesh -100 que contenía 400 g. de Fe_2O_3 al 95%, HCl 2600 al 26% y 195 ml. de H_2SO_4 al 98%, fue reflujaada por 3 hr., luego evaporada hasta bajo 30-100 ton. y el residuo polveado para dar un producto de $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ al 94% (10).

9. Sulfato férrico:

El método de producir $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ por oxidación del FeSO_4 con un compuesto conteniendo N en la presencia de H_2SO_4 , es cambiado para acelerar el proceso al usar como el compuesto conteniendo N, óxidos de N en una mezcla con gas conteniendo O, en un porcentaje en volumen de 1.5-20. El Fe^{2+} es oxidado con aire conteniendo un porcentaje en volumen de 10.0-20.0 de óxido de N (11).

10. Soluciones de sulfato férrico:

El método de producir soluciones de $\text{Fe}_3(\text{SO}_4)_3$ por oxidación de una solución de FeSO_4 en el espacio anódico del diafragma de una celda electrolítica, es cambiado para acelerar el proceso y producir soluciones de $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ para reprocesamiento a un floculante, para purificación de agua. Este proceso se lleva a cabo por oxidación de la solución en una cascada de celdas electrolíticas en grafito o ánodos de Pt a $\geq 50^\circ \text{C}$ y con c.d. en la primera celda electrolítica de la cascada. Esta es mantenida entre 5-7 A/dm^2 y las subsecuentes celdas electrolíticas a $< 5 \text{A}/\text{dm}^2$. Se alimenta el espacio catódico de las celdas electrolíticas con una solución de FeSO_4 más concentrada que la solución que se está oxidando, y provocando una contracorriente del catioloito a través del diafragma, hasta es espacio anódico. El proceso es llevado a cabo con un sello de calor, diafragmas clorados poly(vinílicos clorados) con permeabilidad específica de 0.007-0.012 $\text{l.}/\text{dm}^2\text{-hr}$ (12).

11. Producción continua de sulfato férrico:

Una solución acuosa de FeSO_4 es acidificada con H_2SO_4 a un $\text{pH} \geq 1.5$ y pasada por una capa de bacteria Fe-oxidante, como por ejemplo *Thiobacillus ferrooxidans*, en la presencia de O y CO_2 , en donde el FeSO_4 es oxidado a $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$. La capa bacteriana es suspendida en una pipa de vidrio vertical con mangas de vidrio. La solución oxidada es adecuada para lixiviar de U de su mineral (13).

12. Soluciones acuosas de alta concentración de sulfato férrico:

El FeSO_4 cristalizado en H_2SO_4 acuoso es tratado con O en un reactor cerrado en presencia de sales nítricas, para dar $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ o soluciones básicas de sulfato férrico en alta concentración. Una mezcla de 230 g. de $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, 4.3 g. NaNO_3 en 40 ml. de H_2O , y 90 ml. de una solución acuosa conteniendo 450 g. H_2SO_4 /l., se mezcló y trató con O por 4 hr. para dar una solución conteniendo 40% de $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ (14).

13. Proceso conservador de energía para la manufactura de sulfato férrico:

El $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ granular, adecuado para usar como floculante y coagulante en purificación de agua y tratamiento de aguas residuales, se prepara por suspensión de Fe_2O_3 que contiene de 2-5% de FeO en agua para formar una masa conteniendo de 20-22% Fe , y agregando de 50-70% del H_2SO_4 requerido para formar $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$. El H_2SO_4 es concentrado y la reacción exotérmica eleva la temperatura a 235-245°F. La masa es entonces alimentada con H_2SO_4 adicional para suplir del 100-110% de la cantidad estequiométrica para recircular los gránulos de $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$, en el equipo en que el producto se granula y seca con gases de combustión a 120-180°C. El uso del calor de reacción disminuye los requerimientos de energía para formar un producto satisfactorio (15).

14. Soluciones de sulfato de hierro (III):

El Fe en un lodo conteniendo una mezcla de yeso y $\text{Fe}(\text{OH})_3$, se recupera como una solución de 25-50% de $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$. El lodo de hierro se trata con H_2SO_4 al 95-98% entre 1-12 hr. y es luego filtrado. Una muestra de un compuesto [250 g. (peso seco de 156.6 g.)]

de yeso y $\text{Fe}(\text{OH})_3$ conteniendo 10.4% de Fe en base seca, se mezcla durante 1 hr. con una cantidad estequiométrica de H_2SO_4 al 96%. El filtrado contiene 31.9% de $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ y el residuo 1.8% de Fe, permitiendo un 83% de recuperación de Fe (16).

15. Producción de sulfato férrico a partir de sulfato ferroso:

Mezclando 10 minutos 1 kg. de $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ y 10 kg. de H_2SO_4 al 80%, conteniendo 1% de HNO_3 con burbujeo de aire, se obtiene una suspensión de $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ al 95%. El agente oxidante es NOHSO_4 , que es regenerado en un ciclo (18).

16. Sulfato de hierro (III):

$\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ para floculación en tratamiento de agua, agua de desecho y lodos, es manufacturado por reacción de un mineral tostado conteniendo Fe_2O_3 con H_2SO_4 y oleum mediante aireación y lixiviación con agua del producto poroso de reacción. El aire comprimido a 120-140° C se inyecta a la suspensión de 10 toneladas de mineral tostado en 15.5 toneladas de H_2SO_4 al 76%, y 5.5 toneladas de oleum se agregan durante los siguientes 2 minutos. El producto poroso formado se mantiene 5 hr. a 140-160° C sin suplir calor adicional y se somete a lixiviación durante 12 hr. a 40-50° C con inyección de aire comprimido, para dar 25 toneladas de $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ acuoso al 42% (19).

17. Sulfato Férrico:

Mediante este proceso se obtiene una sustancia de sulfato férrico por oxidación electroquímica de sulfato ferroso. Para aumentar el grado de oxidación de sulfato ferroso a sulfato férrico, se sujeta a electrólisis una solución de sulfato ferroso a 4-5% y se agrega Na_2SO_4 (2.5-3.5 partes por peso/1 parte por peso de ion Fe^{2+}) a la solución luego de 0.5-1 hr. del inicio de la electrólisis. Para prevenir la hidrólisis del sulfato férrico, la solución de sulfato ferroso es acidificado a pH 1-1.5 (20).

18. Método para producir sulfato de hierro(+3) por oxidación de sulfato de hierro(+2) con bacteria Thiobacillus ferrooxidans en una cascada de enzimas:

Este método se mejora para acelerar y simplificar el proceso de oxidación que toma lugar en un sistema de crecimiento continuo de bacteria, en donde el nivel de FeO se mantiene entre 5-25 g./l. y la concentración bacterial se mantiene entre $(1-3) \times 10^8$ celdas/ml. de solución, en el primer fermentador-cultivador (21).

19. Oxidación catalítica de sales metálicas:

FeSO₄ es oxidado a Fe₂(SO₄)₃ por aire en la presencia de un catalizador heterogéneo consistente en una mezcla de óxidos metálicos, por ejemplo: MnO₂, Fe₂O₃, V₂O₅, Ag₂O, y Pt negro, depositado en minerales porosos como carbón negro o poliestireno microporoso. Se sopla aire entre la solución de FeSO₄ y el catalizador. El Fe₂(SO₄)₃ resultante se separa y se usa para flocular lodo rojo (22).

20. Oxidación bacterial de una solución de sal ferrosa a una solución de sal férrica:

La solución lixiviada de FeSO₄ ácido a pH 1.3-2.0, es convertida continuamente a Fe₂(SO₄)₃ por oxidación bacterial en la presencia de aire. La oxidación se realiza en un recipiente lleno de miembros con estructura de panal, cubiertos en su superficie con bacteria como Ferrobacillus ferrooxidans. La solución oxidada es recuperada y rechazada para lixiviar mineral conteniendo U, Cu, Au, Pb, Zn, Co o Ni. Un recipiente cilíndrico se llena con 3400 l. de solución de FeSO₄ conteniendo 9.8 g./l. de Fe²⁺, 1.3 g./l. de Fe³⁺ y 9g./l. de H₂SO₄. Un bloque de miembros de estructura de panal, con un área superficial de 93 m²/m³ y cubiertos con F. ferrooxidans, se inserta en el recipiente y se burbujea aire a 50 m³/h. a través de la solución. Durante la oxidación, la temperatura se mantuvo a 32°C, 10.5 g./l. de Fe³⁺ y 0.88 g/l. de H₂SO₄ se removieron del recipiente, y la solución de descarga se reemplazó con solución fresca a razón de 72 l./h. La solución de oxidación, luego de ajustar su contenido de H₂SO₄, se usa para lixiviar mineral de pirita (23).

21. *Radiólisis de pulso con $^2\text{H}^+$ y $^4\text{He}^{2+}$. Formación rápida y lenta de soluciones de hierro(3+) en soluciones de hierro(+2) ácidas.*

Se midieron los componentes rápidos ($\ll 1$ ms.) y lentos (aprox. 1 s.) en la formación de Fe^{3+} con solución de FeSO_4 0.01M irradiada con $^2\text{H}^+$ (52 MeV/cm) y $^4\text{He}^{2+}$ (220 MeV/cm) en H_2SO_4 0.8N, aireado y desaireado. Estos valores de los componentes $G(\text{Fe}^{3+})$ llevaron a valores para $G(\text{H}) + G(\text{OH})$ y $G(\text{H}_2\text{O}_2)$ a LET's de 52 y 220 MeV/Cm. Los resultados son de acuerdo a la expectativa basada en previos experimentos, en que $G(\text{H}) + G(\text{OH})$ disminuía y $G(\text{H}_2\text{O}_2)$ incrementaba con aumento en LET, debido al incremento en la densidad de especies transitorias en la trayectoria con LET incrementado. Se hicieron comparaciones de los resultados calculados vía dos diferentes formulaciones de cinética-difusional. Una mejor interpretación se obtuvo usando un modelo donde la deposición de energía por rayos-delta energéticos es independiente del centro de la trayectoria (24).

22. *Sulfato de hierro(III) granulado:*

El $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ luego de deshidratación parcial es calentado en un horno vórtice, en la presencia de un gas conteniendo O, durante 40-120 minutos a 120-130°. El $\text{Fe}(\text{OH})\text{SO}_4$ formado, conteniendo $<1\%$ de FeSO_4 , se hace reaccionar con 50-130% de la cantidad estequiométrica del H_2SO_4 al 60%, en un plato de granulación para formar gránulos. La razón molar $\text{Fe}(\text{OH})\text{SO}_4 \cdot \text{H}_2\text{SO}_4$ debe ser de 1:0.69 a 1:0.77 (25).

23. *Sulfato férrico:*

El $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$, producido por oxidación del desecho de FeSO_4 de la producción de TiO_2 con un gas conteniendo O, fue mejorada para simplificar el proceso. Esto se logró al disminuir la temperatura y eliminar la fase de remoción de SO_2 del gas de desecho. Para esto se usa como el gas que contiene O los gases de desecho del bombeo de ácido metatitánico, en el proceso de producción de TiO_2 (la razón $\text{O}_2:\text{SO}_2$ se mantuvo a 100-200:1) y oxidando a 50-90°, pH 4.5-6.0, y una concentración inicial de la solución de 100-

200 g/l. Para disminuir el contenido de FeSO_4 en el producto, la oxidación se llevó a cabo a razón de $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3:\text{FeSO}_4$ de 6.0-6.5:1 y el FeSO_4 precipitado se removió y recirculó a la preparación de la solución inicial (26).

24. Otro:

El sulfato férrico preparado por oxidación de FeSO_4 con *Thiobacillus ferrooxidans*, bajo aireación, se mejora por aireación con 0.002-0.01 porcentaje en volumen de O_3 en aire (17).

III. JUSTIFICACIÓN

El sulfato férrico es una sal de hierro que tiene varias aplicaciones, principalmente en el tratamiento de agua, agricultura y otros procesos. La producción local de este químico presenta varias ventajas para la industria guatemalteca, ya que evita una fuga de divisas debida a las importaciones del mismo u otros químicos sustitutos utilizados en la industria guatemalteca. La producción local ayuda también en la generación de nuevas fuentes de trabajo para los guatemaltecos cuya población va en crecimiento acelerado, aumentando así la demanda y necesidad de trabajo. También se podría presentar una disminución en el costo del producto para el consumidor guatemalteco, resultando así la producción del químico, de beneficio global tanto en lo social como en lo económico.

La producción del sulfato férrico permite explotar, en beneficio general, recursos naturales como lo es el mineral de hierro, que es abundante tanto en el subsuelo como en otras formas, por ejemplo en chatarra metálica y óxidos de hierro, de donde puede ser reciclado y reprocesado. Guatemala es un país rico y abundante en recursos naturales que permiten su adecuada y controlada explotación. Este aspecto es muy importante, ya que aunque existen varios recursos explotados en el país, no todos son explotados de forma adecuada. Es por ello que la industria debe estudiar nuevas formas y usos de nuestros minerales, cuya utilización sea ventajosa, como resulta el caso del sulfato férrico que es una sal de hierro con características de abundante beneficio práctico.

Guatemala es un país de rápido crecimiento tecnológico e industrial, por lo que el estudio y desarrollo de nuevas industrias es de gran importancia para el avance industrial y una mejor integración de nuestro país al gran mercado mundial. Procesos que, como éste, contribuyan al engrandecimiento comercial de nuestro país, resultan de primordial importancia.

IV. OBJETIVOS

A. Objetivos Generales:

1. Búsqueda y selección de un proceso para la fabricación local de sulfato férrico anhidro con bajo contenido de insolubles.
2. Diseñar una línea para la producción de sulfato férrico.

B. Objetivos Específicos:

1. Estudiar distintos procesos de elaboración de sulfato férrico.
2. Realizar una evaluación y selección de un proceso a partir de procesos alternativos.
3. Desarrollar la ingeniería básica para el proceso seleccionado, definiendo parámetros, condiciones de operación, equipo a utilizar y economía.

V. PROBLEMA A RESOLVER

En Guatemala existe un rápido crecimiento industrial, por lo que el problema de producción nacional de sustancias químicas utilizadas en nuestro país, como el sulfato férrico, en lugar de que éste o algún sustituto sea importado, es un asunto primordial a resolver. Es por ello que mediante este trabajo se desea diseñar una línea de producción para la elaboración local de sulfato férrico anhidro, con base en la selección y evaluación de alternativas, con el posterior desarrollo de la ingeniería básica del proceso seleccionado y así contribuir a resolver este problema nacional.

VI. METODOLOGÍA

A. Análisis y evaluación de las alternativas encontradas.

Estudio y tamizado de las alternativas encontradas con base en las condiciones de operación respectivas, disponibilidad de materia prima, equipo requerido, especificaciones del producto y análisis económico del proceso.

B. Selección y descripción del proceso:

Definición de condiciones de operación, materia prima, equipo y especificaciones del producto, así como una descripción detallada del proceso y cada etapa que lo compone.

C. Diagrama de flujo del proceso:

Representación de las operaciones unitarias secuenciales.

D. Definición del equipo de cada operación unitaria:

Descripción del equipo que compone cada operación.

E. Diagrama en planta del proceso:

Esquema de la distribución del equipo en planta.

VII. RESULTADOS

A. Descripción del proceso:

1. Molienda:

El mineral de hierro es alimentado a un molino de quijada para una trituración primaria, donde se reducen los bloques de mineral de 12 pulgadas hasta 1 pulgada. El mineral es luego transportado mediante un sistema de dos bandas hacia una molienda posterior en un molino de martillos donde se reduce hasta una malla 99% menos 200. El mineral es almacenado en sacos y estibado para ser utilizado posteriormente.

2. Reacción:

En un reactor se prepara una suspensión de mineral de hierro mediante la mezcla de agua y mineral de hierro. Después se añade ácido sulfúrico concentrado, en las proporciones adecuadas. La suspensión es agitada para favorecer el mezclado de los compuestos y permitir una reacción de rápida completación.

3. Dilución y Clarificación:

La solución de sulfato férrico obtenida en la etapa anterior es diluida con agua suficiente para clarificar la solución mediante la separación del material insoluble presente. Este material insoluble se precipita y es así separado por decantación de la solución. Estos lodos residuales son sometidos a tres lavados sucesivos para extraer sulfato férrico residual. Estos lavados son bombeados hacia un tanque de proceso y mezclados con el agua utilizada para la reacción. Los lodos son finalmente extraídos del reactor mediante su bombeo y son posteriormente descartados. En el futuro la operación de clarificación se llevará a cabo mediante filtros de vacío.

4. Peletización:

La solución clarificada es bombeada hacia un mezclador-granulador tipo Pug Mill para la peletización. A éste se alimenta continuamente un flujo de sulfato férrico anhidro en polvo para inducir la granulación de la solución, la cual es alimentada de igual forma. El sulfato férrico que se obtiene tiene 3 ó 4 moléculas de hidratación.

5. Secado:

Los gránulos obtenidos durante la peletización son descargados en una tolva que sirve como alimentación a un secador rotatorio. Aquí, los gránulos son calentados con gases de combustión provenientes de un quemador de llama directa, secando los gránulos a unos 450°C , hasta obtener un producto anhidro.

6. Tamizado:

Los gránulos secos son tamizados de forma tal que, los bloques y los finos, sean llevados a una molienda en el molino de martillos y recirculados al peletizador. El producto de tamaño adecuado y uniforme es empacado en sacos y almacenado para su distribución.

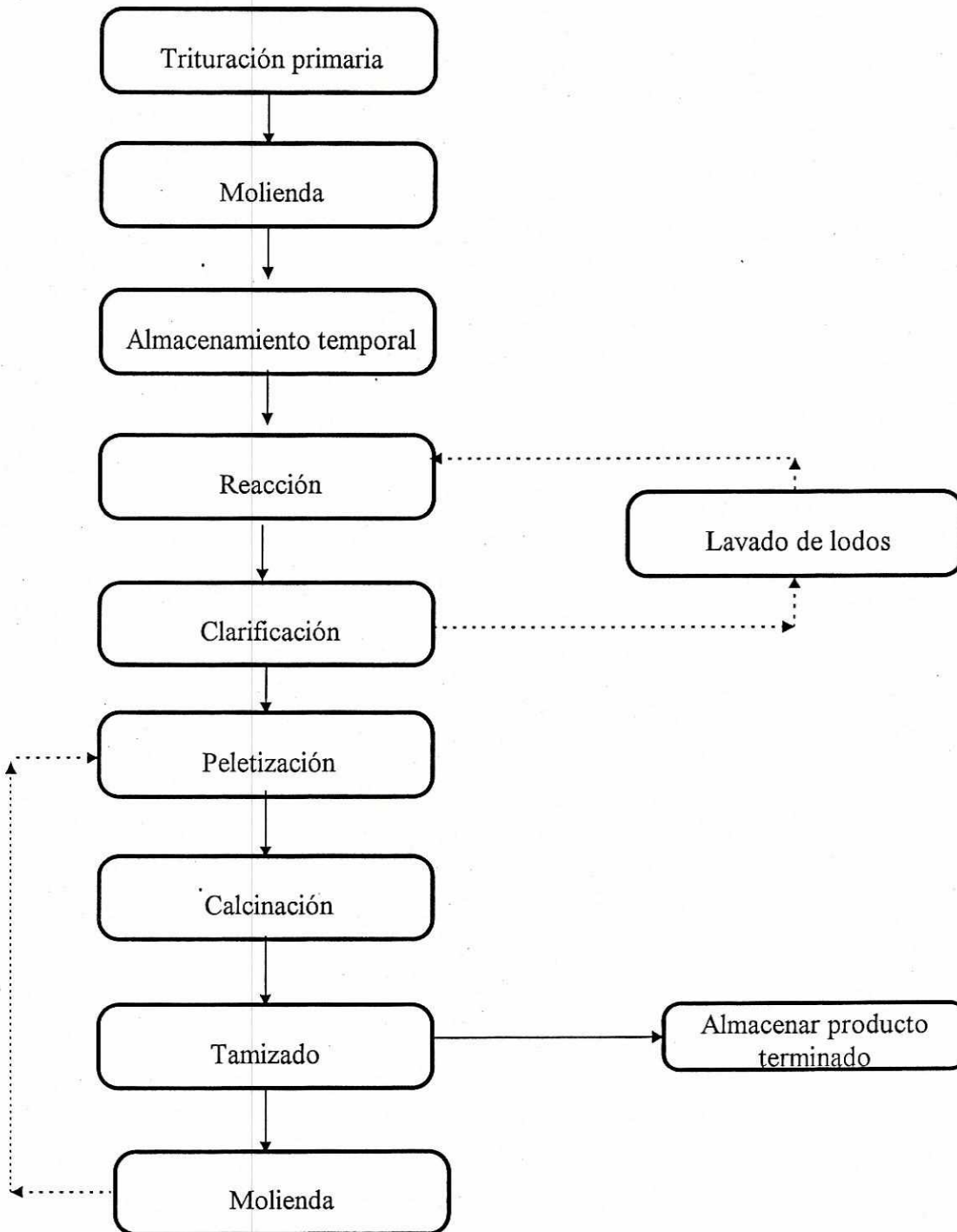
B. Descripción del equipo:

TABLA No. 4: Detalle y especificación de equipo para el proceso.

EQUIPO	MOTOR	DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO
Molino de quijadas	14.9Kw (20 Hp)	Capacidad 15 Ton/h; Reducción 0.3m-25mm(12"-1")
Banda transportadora de hule No. 1	0.75Kw (1 Hp)	m de largo por 0.46m ancho; Cap. 20 Ton/h
Banda transportadora de hule No. 2	1.49Kw (2 Hp)	m de largo por 0.46m ancho; Cap. 20 Ton/h
Molino de martillos	55.93Kw (75 Hp)	Capacidad de 3 Ton/h; Reducción a malla 200
Reactor	---	Capacidad de 5 Ton ; Fibra de vidrio
Almacenador mineral molido	---	Fibra de vidrio o sacos (opcional)
Agitador de hélice	3.73Kw (5 Hp)	Latón
Tanque almacenador No. 1	---	Acero para almacenar ácido sulfúrico; 20 Ton
Tanque almacenador No. 2	---	Fibra de vidrio para almacenar agua
Bomba neumática doble diafragma	1.49Kw (2 Hp)	Con manguera de poliducto de 25.4mm y compresor
Pug-Mill (mezclador-granulador)	3.73Kw (5 Hp)	Acero al carbono; Capacidad de 3 Ton/h
Tanque almacenador No. 3	---	Fibra de vidrio o sacos (opcional) $Fe_2(SO_3)_4$
Tolva de alimentación horno	---	Fibra de vidrio
Tolva de descarga horno	---	Acero al carbono
Horno rotatorio	11.9Kw (15 Hp)	Flujo a contracorriente ; Capacidad 3 Ton/h
Tamiz circular tipo Tromel	1.49Kw (2 Hp)	Capacidad de 2 Ton/h
Depósito del producto terminado	---	Fibra de vidrio o sacos (opcional)
Molino de martillos	14.9Kw (20 Hp)	Capacidad de 2 Ton/h ; reducción a malla 80

C. Diagrama de Flujo del Proceso:

FIGURA No. 4: Diagrama de Flujo del Proceso



D. Análisis Económico del Proceso:

TABLA No. 5: Costos fijos y variables del proceso de sulfato férrico.

Costos del Proceso:	
<i>i. Costos de inversión de equipo</i>	<u>Q.204,000.00</u>
TOTAL COSTO DE INVERSIÓN	Q.204,000.00
<i>ii. Costos Variables:</i>	
-Materia prima / TM	Q. 866.41
-Energía / TM	Q. 14.07
-Combustible / TM	Q. 168.00
-Empaque (Sacos) / TM	Q. 35.00
-Gastos administración y otros (5%)	<u>Q. 53.54</u>
TOTAL COSTOS VARIABLES /LOTE	Q. 1,137.02

TABLA No. 6: Otros datos del proceso

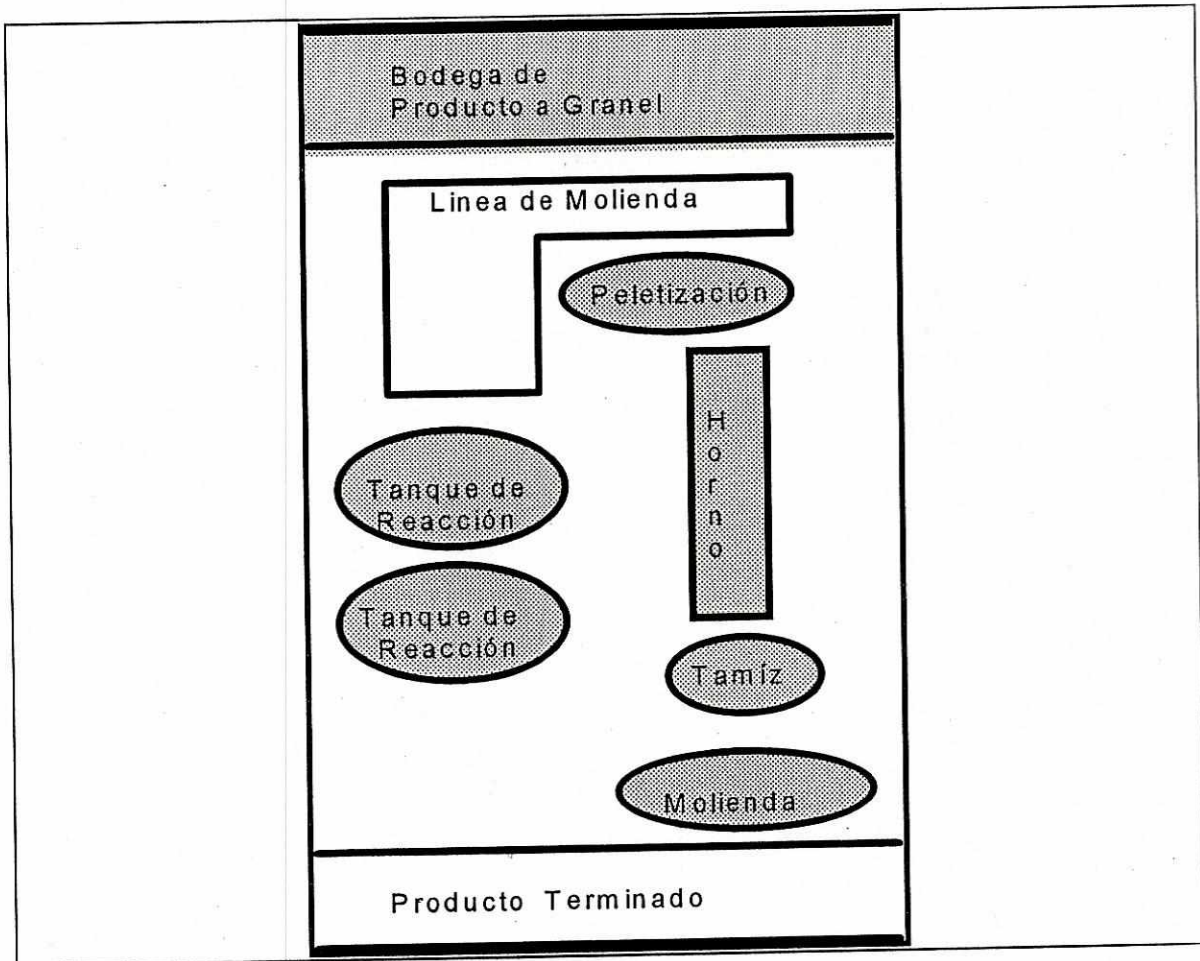
Toneladas / mes:	200 Ton métricas de Sulfato Férrico anhidro
Costo total / Ton métrica:	Q. 1,137.02 / Ton métrica de $Fe_2(SO_4)_3$
Precio Venta / Ton métrica:	Q. 1,170.00 / Ton métrica de $Fe_2(SO_4)_3$
Margen Neto:	Q. 32.98 / Ton métrica de $Fe_2(SO_4)_3$
* El tiempo de retorno de la inversión inicial será de 2.6 años sin tomar en cuenta que el costo del equipo se cubrirá también con otros procesos, lo que lo disminuye considerablemente.	
* Porcentaje de óxido férrico en el mineral de hierro a utilizar: % Fe_2O_3 promedio en la materia prima 66.20%	

E. Especificación de las condiciones de operación:

1. La molienda del mineral de hierro deberá ser tal que se obtenga un polvo finamente dividido para que entre el 95-98% pasen por una malla 200.
2. La solución inicial es llevada a cabo con un 20-25% en exceso del óxido férrico teórico requerido.
3. El ácido sulfúrico utilizado en la reacción deberá ser preferentemente concentrado entre el 85% y 98%, según las condiciones de operación.
4. Se deberá alimentar el sulfato férrico anhidro en la peletización con la solución concentrada, hasta alcanzar una hidratación de 24-25% aproximado del material seco (a determinar en el proceso), y con un flujo constante, tanto del sulfato férrico anhidro como de la solución acuosa de sulfato férrico, teniendo cuidado que la aglomeración no termine en pastosidad.
5. La calcinación del producto se deberá llevar a cabo preferentemente en una atmósfera oxidante, manteniendo los gránulos a una temperatura de entre 400-450°C durante un período de tiempo suficiente para que el material pierda toda humedad y el agua de hidratación.
6. Luego del tamizado, los finos y gruesos serán molidos y recirculados a la etapa de peletización, como alimentación de sulfato férrico anhidro en polvo.
7. Se deberá tener un adecuado control de la temperatura en cada etapa del proceso.

F. Diagrama en Planta del Proceso:

FIGURA No. 5: Diagrama de planta del proceso



VIII. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Debido a que la presencia de insolubles es un factor utilizado como criterio para juzgar la calidad de los coagulantes utilizados en el tratamiento de aguas, un bajo porcentaje de insolubles es un factor importante a considerar en el producto final. Es por ello que este proceso fue seleccionado para producir un producto de sulfato férrico anhidro normal, a partir de un mineral rico en óxido férrico y ácido sulfúrico, para formar una solución de sulfato férrico sin un contenido apreciable de insolubles.

El proceso puede ser aplicado prácticamente a cualquier solución de sulfato férrico que no contenga cantidades substanciales de compuestos insolubles, para obtenerse un producto de mejor calidad. Un aspecto importante y económico es el uso de una suspensión de óxido férrico con ácido sulfúrico en lugar de una solución de sulfato ferroso, ya que esto involucraría el costo de la manufactura inicial del sulfato ferroso, mientras que al utilizar mineral de hierro de alto contenido férrico, el cual es abundante en suelo guatemalteco, pueden obtenerse costos muy favorables.

La molienda inicial del mineral en la primera etapa es necesaria, ya que mientras más fino se utilice el mineral en la reacción, mayor será el área de contacto de éste con el ácido sulfúrico, permitiendo así, que la reacción se lleve a cabo rápidamente.

El mineral de hierro, finamente molido y en suspensión, es sometido a la acción de ácido sulfúrico concentrado. Se sugieren suspensiones con un 20-25% en exceso del óxido férrico teórico requerido para acelerar la reacción y obtener una remoción substancialmente completa del ácido sulfúrico en un período razonable. El ácido deberá ser preferentemente al 85%. Si se usa un ácido sulfúrico de menor concentración, el tiempo de la reacción aumenta a un grado irrazonable y si la concentración es mucho mayor, se pueden precipitar sales ácidas. Durante la reacción se produce una evaporación considerable de agua, de

forma que la relación de SO_3 con el agua, tiende a aumentar. Si el aumento supera aquel representado por un ácido de mayor concentración, las sales ácidas mencionadas tenderán a cristalizar y precipitar. Si esta precipitación no se evita, puede proseguir hasta que la masa completa entre en fase sólida. Sin embargo, esta tendencia puede ser corregida mediante la adición de una cantidad suficiente de agua, en el momento que las sales ácidas empiecen a separarse. Luego de que, entre el 27% a 50% del ácido haya reaccionado con el óxido, esta tendencia se detiene y ya sólo se separan sales neutras de la solución concentrada. Estas sales neutras precipitadas permiten clarificar la solución. Así, la solución es decantada del reactor y los lodos presentes, formados por la precipitación del material insoluble (silicatos u otro material insoluble), son lavados para extraer todo el sulfato férrico residual y luego bombeados para ser descartados. El agua es posteriormente utilizada como agua de alimentación de un siguiente lote.

Durante la reacción se produce un aumento en la temperatura, el cual permite que la reacción se complete sin requerir que se supla calor adicional y también permite la evaporación de agua, haciendo que la solución se concentre. Esta temperatura puede requerir ser regulada para prevenir la separación de cristales en el líquido, lo cual se logra mediante una adición lenta y controlada del ácido a la suspensión.

Posteriormente, la solución concentrada es sometida a una granulación. Esta granulación es inducida mediante la adición de sulfato férrico anhidro. En esta etapa se debe cuidar las condiciones, ya que se pueden producir insolubles debido al aumento en la temperatura que resulta en la formación de sales básicas. Un método, adecuado para evitar su formación, es la mezcla de los licores relativamente concentrados de sulfato férrico del proceso, con una cantidad suficiente de sulfato férrico anhidro en polvo, para obtener un material que contenga una cantidad relativamente alta de sulfato férrico hidratado. La hidratación del material seco a utilizar deberá corresponder a un grado de hidratación de 24-25%, aproximadamente. Esta es la cantidad de agua presente en el sulfato férrico normal

($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{SO}_3 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$). Sin embargo, grados de hidratación igualmente mayores o menores, pueden ser aceptados. Las condiciones de esta adición del sulfato férrico anhidro al licor, deben ser cuidadosamente controladas. Si se diera un aumento grande en la temperatura o el material fuera sometido a una temperatura moderadamente alta durante un período largo, podría resultar la formación de insolubles. Una temperatura adecuada para evitar la formación de insolubles, sería de alrededor de 70°C . Sin embargo, bajo estas condiciones de operación es deseable mantener los licores de alimentación a una temperatura un poco mayor para obviar la solidificación del líquido. Además, la adición del material anhidro, resulta en una cantidad considerable de calor de hidratación producido, aproximadamente entre $105\text{-}110^\circ\text{C}$, por lo que se debe controlar, a menos que el material no permanezca mucho tiempo en el mezclador. Así, prácticamente, todo el producto deshidratado final se obtendrá en una condición soluble.

En esta etapa del proceso se da la transformación completa del agua de solución del licor a agua de cristalización del material seco pero hidratado. Esta transformación es promovida por la adición y mezclado del sulfato férrico anhidro y el licor de sulfato férrico. Este mezclado aumenta con la agitación y el uso de sulfato férrico anhidro tan fino como sea posible. Mientras más fino sea el estado del material anhidro alimentado al líquido, más uniforme y regular serán las partículas o pellets del sulfato férrico seco hidratado. Esto también resulta ser un método conveniente para controlar el tamaño de los gránulos.

El calor generado, durante la hidratación del material anhidro con el agua de la solución, durante la adición y mezcla, también tiende a removerse disipándose como calor latente de evaporación de una porción del agua. Esto reduce la cantidad de sulfato anhidro requerido para la remoción completa del agua de solución presente en los licores del sulfato. La cantidad de sulfato anhidro requerido en el proceso varía de acuerdo a la cantidad de agua evaporada en esta etapa. Si un exceso de material anhidro se encuentra presente, no habrá problema e inclusive, bajo ciertas condiciones, el uso de un exceso puede ser deseable

de forma de acelerar la velocidad de absorción de agua de solución y para reducir las temperaturas. El tamaño de gránulos varía dependiendo de la velocidad en que se supe el polvo de sulfato férrico anhidro y la solución al mezclador.

El material seco, conteniendo agua de cristalización, debe ser calcinado en el horno a una temperatura suficiente para formar la sal anhidra normal, sin la formación de insolubles. Si se sometiera la solución formada durante la reacción directamente a secado completo y deshidratación en la forma ordinaria (fuego directo) a una temperatura suficiente para remover toda el agua presente, se convertiría, en un grado considerable, en productos insolubles (sulfatos básicos), que serían inadecuados para propósitos comerciales. Es por ello que la solución es primero sometida a granulación bajo condiciones controladas, como las mencionadas anteriormente y asegurar así el bajo contenido de insolubles y posteriormente a la calcinación.

El producto debe descargar a una temperatura suficiente que asegure la volatilización de cualquier ácido libre y del agua presente. Una temperatura de descarga adecuada sería de unos 450°C , aproximadamente. El uso del horno rotatorio resulta práctico debido a que el producto es de naturaleza dura y densa.

El producto esperado tendrá una forma de gránulos duros y densos. Es un producto prácticamente anhidro que se espera no contenga ácido libre, sea por lo menos un 99% soluble en agua y en apariencia consiste esencialmente de sulfato férrico normal.

El proceso para la manufactura de sulfato férrico resulta ser un proceso de bajos requerimientos tanto energéticos como económicos. Entre la razones de esto se encuentra que el calor liberado durante la reacción proporciona suficiente energía aprovechable para asegurar la completación de la reacción en el proceso. Las condiciones de operación del proceso permiten que la reacción entre el óxido y el ácido se complete rápidamente y sin la aplicación de calor externo.

Las condiciones de la reacción inicial son importantes, especialmente la finura del óxido de hierro, la concentración del ácido y la forma y temperatura de mezclado de los ingredientes. De esta forma se realiza una reacción completa de los ingredientes para formar un sulfato normal. El hecho que se tenga un óxido fino, permite un mejor contacto del ácido con el mineral facilitando la reacción e incrementando así la velocidad de la misma debido al mayor área de contacto resultante. La concentración del ácido también es importante, aunque la concentración exacta depende de varios factores, tales como la humedad presente, la temperatura del equipo, la velocidad de disipación del calor del equipo, temperatura de los reactivos, etc. Es por ello que en general se considera que la concentración del ácido deberá ser alta. Se considera también que se deberá trabajar a una temperatura controlada ya que puede aumentar en el transcurso de la reacción. Con esto se estarán despidiendo vapores.

Debido a que la temperatura de la mezcla aumenta, el agua presente se pierde rápidamente en forma de vapor, manteniendo la temperatura relativamente constante y consiguiendo formar una solución concentrada.

La cantidad de sulfato férrico anhidro a agregar depende de los requerimientos del material a aglomerar, el tamaño deseado de los gránulos, la velocidad de agitación, etc. El mezclador deberá ser cargado por un lado, con la solución y el sulfato férrico anhidro, y descargado por el otro lado el material aglomerado. De esta forma el mezclador servirá como aglomerador de las partículas de sulfato férrico y como clasificador del producto terminado por tamaño de los gránulos. Las partículas pequeñas se acumulan en la parte inferior, mientras las grandes en la superficie donde el producto aglomerado es descargado continuamente. Los gránulos esperados son globulares y de superficie tosca, son fácilmente descargados y no tienden a estancarse o empastarse. Presentan un tamaño relativamente uniforme, libre de finos.

El producto de aquí obtenido resulta ser extremadamente duro, denso y susceptible al manejo sin sufrir autoabrasión. Es por ello que es preferible completar el proceso sometiendo al producto a calcinación y observando las limitaciones de temperatura mencionadas. Se obtiene así un producto substancialmente libre de acidez, anhidro y muy bajo en insolubles principalmente sulfato férrico básico y óxido férrico no reaccionado, y es además muy bajo en sulfato ferroso.

En el proceso se aprovecha la disponibilidad de parte del equipo, por lo cual se economiza en su compra resultando el proceso en menor inversión. En la planta se dispone de toda una línea de molienda que cumple los requisitos de reducción de la materia prima por lo que es totalmente adaptable al proceso. De igual forma se dispone de la facilidad de trabajar la fibra de vidrio, por lo que el reactor y otros tanques de fibra puede ser elaborado en la planta, reduciendo de igual forma la inversión. El horno se encuentra actualmente en construcción. Gran parte del equipo puede ser compartido con otros procesos. Se cuenta también con terreno adaptable al proceso. El costo de la materia prima es bajo y se debe, básicamente, a gastos de extracción y flete. Es por estas consideraciones que se puede hablar del proceso como un proceso económico y de bajos requerimientos energéticos.

El exceso de óxido férrico utilizado en un inicio, asegura que todo el ácido libre reaccione permitiendo así que se obtenga un producto libre de acidez. Este exceso es descartado mediante la clarificación de la solución y su posterior decantación. Los lodos residuales son lavados y el agua de lavado, que contiene sulfato férrico disuelto en pequeñas cantidades, es utilizada como agua de alimentación para procesos siguientes, aprovechándose así el sulfato férrico producido residual.

El sulfato férrico anhidro en polvo utilizado como alimentación en la etapa de granulación de la solución concentrada de sulfato férrico, es producto de corridas anteriores.

El producto tamizado es empacado y tanto los finos como los gruesos son molidos de nuevo hasta un polvo fino y alimentados al granulador-mezclador.

Algunos de los factores de mayor importancia para este proceso, son el control de temperatura y acidez de la solución para evitar así la formación de insolubles.

Debido a que el calor producido durante la etapa de reacción y la de mezclado en la granulación no son excesivos pero sí suficientes, no será necesario suplir ni remover calor del sistema mediante el uso de enchaquetado u otros métodos. Esto contribuye a disminuir los costos del proceso.

Durante la etapa de clarificación se elimina todo el óxido férrico residual que no reaccionó así como material insoluble (silicatos u otros) asegurando la calidad del producto.

IX. CONCLUSIONES

- A. Se seleccionó un proceso para la manufactura local de sulfato férrico a partir de mineral de hierro de suelo guatemalteco con un contenido férrico de alrededor de 66.20% para obtener un producto con aproximadamente 89.79%.
- B. Se diseñó una línea para la producción de sulfato férrico tomando en cuenta la ingeniería básica del proceso y considerando aspectos económicos para un proceso de costos bajos que permiten un margen neto de ganancia de Q. 32.98/ Ton métrica de producto respecto del precio de venta actual y el costo del producto.
- C. El proceso presenta un producto de bajo contenido de insolubles en estas condiciones de operación, lo cual es un factor importante de calidad para fines comerciales.

X. RECOMENDACIONES

- A. Se deberán evaluar nuevas fuentes, ricas en óxido férrico, para la suspensión, ya que el proceso puede ser aplicado prácticamente a cualquier solución de sulfato férrico que no contenga cantidades substanciales de compuestos insolubles, ya que el mineral de hierro presenta un contenido promedio de óxido férrico de aproximadamente 66.20%.
- B. El diseño de la línea para la producción de sulfato férrico deberá ser cuidadosamente estudiado durante la puesta en marcha para hacer las modificaciones correspondientes en cuanto a la ingeniería básica, equipo y parámetros de operación y cumplir así con las condiciones de operación requeridas en el proceso.
- C. El producto no presenta contenido de insolubles en estas condiciones de operación, sin embargo en caso de querer evitar la clarificación para lograr “cero” insolubles en el producto final, se podría adaptar una etapa de flotación del mineral previa a la reacción para asegurar un porcentaje menor de insolubles, y evitar la dilución, clarificación y la etapa de peletización mediante la mezcla de una solución de sulfato férrico y sulfato férrico anhidro en polvo.

XI. BIBLIOGRAFÍA

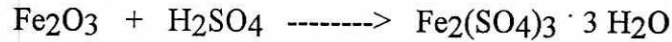
- (1).-BOLIDEN INTERTRADE INC. 1972. **FERRI-FLOC For water and waste water treatment.** Tennessee Chemical Company, United States.
- (2).-CHEMICAL ABSTRACT. 1938-1983.
- (3).-United States Patent Office. Patent No. 2769689 Nov. 6, 1956. **Process for treatment of waste pickle liquor.** Gustave E. Kiddle.
- (4).-CHEMICAL ABSTRACT. 1966 (Jul-Dec) **Oxidation of dissolved ferrous and vanadous compounds by bacteria.** George F. Comstock. No. 3414-b, Cap. 18.
- (5).-CHEMICAL ABSTRACT. 1969 (Jun-Jul) **Oxidation of ferrous compounds and reduction of ferric compounds continuously.** R.L. Cannon. Pg. 101 No.89318a, Cap. 49, Vol No.70, Pat. No. 1143139 Brit.
- (6). CHEMICAL ABSTRACT. 1970 (Jan-Jun) **Interaction of ferric oxide with sulfuric acid.** F.N. Standen.No. 45542f, Cap. No.49, Vol. No. 72.
- (7). CHEMICAL ABSTRACT. 1971 (Jan-Jun) **Catalytic oxidation of iron sulfate.** KLP.G. No. 55788w, Pat. No. 1928644 Ger.Offen.
- (8). CHEMICAL ABSTRACT. 1972 (Jan-Jun) **Ferric Sulfate.** Takeo Fukutomi. No. 87966k, Pat. No. 7140532 Japan.
- (9). CHEMICAL ABSTRACT. 1971 (Jan-Jun) **Thermochemical reactions of some sulfur-containing materials during heating in oxidizing and inert media.** M. Dokladal. No. 68481r, Cap. No 69, Vol No. 74.

- (10). CHEMICAL ABSTRACT. 1972 (Jul-Dec) **Ferric sulfate**. H. Sankaran. Pg. 108, No. 141933n Vol No. 77 Pat. No. 128320 India.
- (11). CHEMICAL ABSTRACT. 1973 (Jul-Dec) **Ferric sulfate**. M. E. Giller. No. 7533r, Cap. No. 49., Vol No. 79 , Pat. No. 368190 USSR.
- (12). CHEMICAL ABSTRACT. 1973 (Jul-Dec) **Ferric sulfate solutions**. V. A. Ryabin. Pat. No. 381610 USSR.
- (13). CHEMICAL ABSTRACT. 1975 (Jan-Jun) **Continuous production of ferric sulfate**. E. C. Houston. No. 143349z, Vol. No. 82, Pat. No. 7300722 S.Africa.
- (14). CHEMICAL ABSTRACT. 1976 (Jan-Jun) **Highly concentrated aqueous ferric sulfate solutions**. No. 12074f, Vol. No. 84, Pat. No. 75106897 Japan.
- (15). CHEMICAL ABSTRACT. 1976 (Jul-Dec) **Energy conservating process for manufacturing ferric sulfate**. J. C. Brosheer. No. 126744u, Vol. No. 85, Pat. No. 3954953 U.S.
- (16). CHEMICAL ABSTRACT. 1977 (Jul-Dec) **Iron (III) sulfate solutions**. No. 87183e, Vol. No. 87, Pat. No. 4036941 U.S.
- (17). CHEMICAL ABSTRACT. 1980 (Jul-Dec).No. 28750p, Vol. No. 93.
- (18). CHEMICAL ABSTRACT. 1981 (Jul-Dec). **Production of ferric sulfate form ferrous sulfate**. L. J. Urbanele. No. 117818a. Vol. No. 95, Pat. 183340 Czech.
- (19). CHEMICAL ABSTRACT. 1975 (Jan-Jun). **Iron (III) sulfate**. Hans J. Roehrborn. No. 74965g, Cap. 60, Vol. 82.

- (20). CHEMICAL ABSTRACT. 1976 (Jan-Jun). **Ferric sulfate**. N. I. Plotnikov. No. 171511f, Cap. 72, Vol. 84, Pat. 966016 USSR SU.
- (21). CHEMICAL ABSTRACT. 1976 (Jul-Dec). **Method for producing iron (3+) sulfate by oxidizing iron (+2) sulfate with the bacteria Thiobacillus ferrooxidans in a cascade of enzymes**. E. G. Kuznetsova. No. 162745d, Cap. 49, Vol. 85, Pat. 518465 USSR.
- (22). CHEMICAL ABSTRACT. 1978 (Jan-Jun). **Catalytic oxidation of metal salts**. T. Jurecic. No. 197152x, Vol. 88, Pat. 2332957 Fr. De mande.
- (23). CHEMICAL ABSTRACT. 1978 (Jul-Dec). **Bacterial oxidation of a ferrous salt solution to a ferric salt solution**. A. E. Barlay. No. 46981m, Vol. 89, Pat. 2742199 Ger. Offen.
- (24). CHEMICAL ABSTRACT. 1978 (Jul-Dec). **Pulse radiolysis with $^2\text{H}^+$ y $^4\text{He}^{2+}$. Fast and slow formation of iron (3+) in acidic iron (2+) solutions**. Myran C. Sauer Jr.No. 171764u, Vol. 89
- (25). CHEMICAL ABSTRACT. 1979 (Jan-Jun). **Granulated iron (III) sulfate**. L.D. Bok. No. 154250b, Cap. 49, Vol. 90, Pat. 2728047 Ger. Offen.
- (26). CHEMICAL ABSTRACT. 1983 (Jan-Jun). **Ferric sulfate**. Kharkov Polytechnic Institute, Sumy. No. 109891r, Vol. 98, Pat. 715483 USSR.

ANEXOS

A. Reacción:



B. Análisis del mineral de hierro:

TABLA No. 7 Análisis del porcentaje de hierro en mineral

Número muestra	peso muestra	% Fe ₂ O ₃
1	18.770	64.00
2	18.870	62.00
3	19.590	68.00
4	19.180	65.00
5	18.190	72.00

Porcentaje promedio de la materia prima : 66.20 % Fe₂O₃

C. Cálculos Teóricos:

Tomando como base un lote de 1 TM de sulfato férrico anhidro producido se necesitarán:

1. Ácido requerido para la reacción:

$$1 \text{ TM Fe}_2(\text{SO}_4)_3 * \frac{1 \text{ Kmol Fe}_2(\text{SO}_4)_3}{399.88 \text{ Kg Fe}_2(\text{SO}_4)_3} * \frac{3 \text{ Kmol H}_2\text{SO}_4}{1 \text{ Kmol Fe}_2(\text{SO}_4)_3} * \frac{100.09 \text{ Kg H}_2\text{SO}_4}{1 \text{ Kmol H}_2\text{SO}_4} =$$

$$0.751 \text{ TM H}_2\text{SO}_4 * \frac{100 \text{ Kg Ácido}}{98 \text{ Kg H}_2\text{SO}_4} = 0.766 \text{ TM Ácido al 98\%}$$

2. Mineral requerido para la reacción:

$$1 \text{ TM Fe}_2(\text{SO}_4)_3 * \frac{1 \text{ Kmol Fe}_2(\text{SO}_4)_3}{399.88 \text{ Kg Fe}_2(\text{SO}_4)_3} * \frac{1 \text{ Kmol Fe}_2\text{O}_3}{1 \text{ Kmol Fe}_2(\text{SO}_4)_3} * \frac{159.68 \text{ Kg Fe}_2\text{O}_3}{1 \text{ Kmol Fe}_2\text{O}_3} =$$

$$0.399 \text{ TM Fe}_2\text{O}_3 * \frac{100 \text{ TM mineral}}{66.2 \text{ TM Fe}_2\text{O}_3} = 0.603 \text{ TM mineral con un 66.2\% de Fe}_2\text{O}_3$$

$$+ 0.151 \text{ TM mineral que es el 25\% en exceso}$$

$$0.754 \text{ TM de mineral de hierro}$$

3. Agua requerida para la reacción:

$$1 \text{ TM Fe}_2(\text{SO}_4)_3 * \frac{1000 \text{ Kg}}{399.87 \text{ Kg Fe}_2(\text{SO}_4)_3} * \frac{1 \text{ Kmol}}{1 \text{ Kmol Fe}_2(\text{SO}_4)_3} * \frac{4 \text{ Kmol H}_2\text{O}}{1 \text{ Kmol H}_2\text{O}} * \frac{18 \text{ Kg H}_2\text{O}}{1 \text{ Kmol H}_2\text{O}}$$

$$* \frac{1 \text{ Lt H}_2\text{O}}{1 \text{ Kg H}_2\text{O}} * \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ Lt}} = 0.180 \text{ m}^3 \text{ de H}_2\text{O}$$

y considerando que se utiliza un exceso para dilución de la solución se pueden aproximar a 4 m^3 por la capacidad del tanque de reacción.

D. Rendimiento promedio esperado de la reacción:

Tabla No.8: Porcentaje de Sulfato Férrico Anhidro en el producto de la reacción.

Número de muestra	% Fe ₂ (SO ₄) ₃
1	89.10
2	91.35
3	87.90
4	89.35
5	91.25

Porcentaje promedio de Sulfato Férrico es de 89.79%

E. Análisis de Costos:

1. Inversión inicial:

TABLA No. 9: Costos del equipo.

EQUIPO	COSTO
Molino de quijadas	Q. 90,000.00
Banda transportadora de hule No. 1	Q. 1,000.00
Banda transportadora de hule No. 2	Q. 3,000.00
Molino de martillos No. 1	Q. 70,000.00
Reactor (2)	Q. 14,000.00
Almacenador No.1: mineral molido	sacos
Agitador de hélice	Q. 12,000.00
Tanque almacenador No. 1	Q. 1,000.00
Tanque almacenador No. 2	Q. 600.00
Bomba neumática doble diafragma	Q. 20,000.00
Pug Mill (mezclador-granulador)	Q. 50,000.00
Almacenador No.3 material hidratado	sacos
Tolva de alimentación horno	Q. 2,000.00
Tolva de descarga horno	Q. 3,000.00
Horno rotatorio	Q.170,000.00
Tamiz circular tipo Tromel	Q. 40,000.00
Molino de martillos No.2	Q. 30,000.00
Almacenador No. 4 producto terminado	sacos

Costo total del equipo requerido: Q. 506,600.00

Costo del equipo existente en la planta: Q. 302,600.00

Costo total de inversión en equipo: Q. 204,000.00

NOTA: Los precios incluyen el costo de los accesorios, motores, tubería e instalación

2. Costos Variables:

TABLA No. 10: Materia Prima (Base: 1 Ton métrica de $Fe_2(SO_4)_3$).

Material	Precio unitario	Cant. Req. / lote	Costo total
Mineral de Hierro	Q. 400.00 / Ton	0.754 Ton	Q. 301.06
Ácido sulfúrico	Q. 725.00 / Ton	0.766 Ton	Q. 555.35
Agua	Q. 2.50 / m ³	4 m ³	Q. 10.00

Costo / lote de Materia Prima Total Q. 866.41

TABLA No. 11: Requerimiento Energético (Base: 1 Ton métrica de $Fe_2(SO_4)_3$).

EQUIPO	Hp	Kw	H/TM	Q. Total/TM
Molino de quijada	20	14.91	0.15	1.68
Banda transportadora No. 1	1	0.75	0.04	0.02
Banda transportadora No. 2	2	1.49	0.04	0.04
Molino de martillo	75	55.93	0.05	2.10
Agitador de hélice	5	3.73	1	2.80
Compresor de bomba neumática	2	1.49	1	1.12
Pug Mill (mezclador-granulador)	5	3.73	1	2.80
Horno rotatorio	15	11.9	0.33	2.95
Tamiz circular tipo Tromel	2	1.49	0.50	0.56

Costo requerimiento energético / TM Q. 14.07

NOTA: 1 Hp es equivalente a 0.7457 Kws y el costo del Kw-hr es de Q. 0.75.

TABLA No. 12: Requerimiento de Combustible en el horno.

Combustible	Precio	Gls. / TM	Q. / TM
Bunker	Q. 6.00	28 Gls.	Q. 168.00

