

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERIA GEOLOGICA MINERA Y METALURGICA

DEPARTAMENTO DE METALURGIA

**"DISEÑO DE UNA PEQUEÑA PLANTA PARA
LA PRODUCCION DE SULFATO DE ALUMINIO"**

Proyecto presentado por el Bachiller

JULIO D. BONELLI ARENAS

para obtener el título de INGENIERO METALURGISTA

Lima - Perú - 1973

**Dedico este modesto trabajo a mis
queridos padres y a mi muy apreciada
hermana.**

INTRODUCCION

En cumplimiento con el Reglamento Interno de la Universidad para optar el título de Ingeniero Metalurgista, me permito presentar el trabajo intitulado: "Diseño de una pequeña planta para la producción de sulfato de aluminio".

Dicho proyecto tiene en cuenta el aprovechamiento de la chatarra de los cátodos de aluminio de la Planta Electrolítica de Zinc, en la fundición de La Oroya, de la Cerro de Pasco Co., para la producción de sulfato de aluminio anhidro, producto que puede ser excelentemente utilizado en la purificación de las aguas de río, que tienen cantidades apreciables de sílice y de óxidos metálicos en solución.

El proceso que nos permite obtener el sulfato anhidro, y que es materia de esta tesis, es bastante diferente de los procedimientos clásicos, ya que emplea aluminio metálico y una solución de ácido clorhídrico, que actúa sólo como disolvente del aluminio.

A simple vista, la ventaja del proceso, en lo que concierne a las materias primas, es bastante notoria, ya que el aluminio en forma de chatarra no cuesta nada, el ácido clorhídrico es un disolvente que se regenera, y por lo tanto, sólo se realiza una inversión, y el ácido sulfúrico es fabricado por la compañía, por lo que resulta muy barato, siendo además de alta calidad.

En lo que respecta al equipo utilizado, éste es bastante simple, y por lo tanto es posible que pueda ser fabricado aquí en el Perú.

Pero la importancia más significativa de este proyecto, como trabajo de tesis, es que constituye un proceso integral, ya que va desde la parte experimental, a nivel de laboratorio, hasta el diseño y evaluación de la planta comercial.

El trabajo en sí consta de 4 partes principales. En la primera se mencionan aspectos generales del sulfato de aluminio, tales como una breve reseña histórica de su evolución, nomenclatura y especificaciones, usos y propiedades y métodos de manufactura. En la segunda parte, se estudia la termodinámica, estequiometría y cinética de las principales reacciones que ocurren en el proceso; al final de esta parte se enumeran los principales aspectos de la experimentación en el laboratorio. La tercera parte comprende el diseño del proceso y la especificación del equipo, calculado en base a los datos de laboratorio. La última parte constituye el estudio económico del proyecto, donde se calculan determinados valores para apreciar si es factible o no su puesta en marcha.

Finalmente, deseo manifestar mi más profundo agradecimiento a todas aquellas personas que colaboraron conmigo en la realización de este trabajo, ya sea aportando consejos, ayudando en las pruebas experimentales, o dando facilidades de toda índole, donde especialmente destacaron mis compañeros de labor del Laboratorio Metalúrgico del Departamento de Investigaciones (Research) de la Cerro de Pasco Co.

J. D. B. A.

Indice de Materias

I) Generalidades

	Pags.
A. Historia de los Alúmenes	1 - 4
B. Propiedades y Usos del Sulfato de Aluminio	4 - 6
1. Propiedades Generales	4 - 6
2. Propiedades Particulares de algunos sulfatos de aluminio	6
3. Usos	6 - 7
C. Datos Estadísticos	7

II) Tecnología General

A. Estudio de Materia Prima	8
B. Métodos o procedimientos de manufactura	8 - 13
1. Métodos empleados en la industria	9 - 11
2. Métodos usados en el laboratorio	11 - 13
3. Método adoptado en el presente trabajo	13
C. Tecnología de las Operaciones Unitarias y de los Procesos Unitarios	13 - 54
1. Aspectos Técnicos	13 - 26
2. Parte Experimental	26 - 54

III) Ingeniería General

A. Cálculo del Flow-Sheet	55 - 64
1. Datos de Laboratorio	55 - 56
2. Diagrama de Flujo del Equipo propuesto	57
3. Cálculos a partir de las reacciones involucradas ...	58 - 61

	Pags.
4. Balance de Materiales	61 - 63
5. Flujo de Materiales	63 - 64
B. Diseño y Especificación del Equipo	64 - 95
1. Reservorios	64 - 66
2. Mezclador líquido - sólido	66 - 68
3. Filtros	68 - 69
4. Evaporador	69 - 73
5. Calcinador	73 - 77
6. Sistema de Condensación	77 - 84
7. Sistema de Absorción de Cloruro de Hidrógeno	84 - 91
8. Diagrama de Flujo Cuantitativo del Proceso	92 - 95
C. Arreglo de Planta (Plant Layout)	95 - 97
1. Plan de distribución	97
2. Plan de elevación	97

IV) Economía General

A. Localización de la Planta	98
B. Estimación de Inversiones	99 - 102
1. Determinación del Capital Fijo	99 - 101
2. Determinación del Capital de Operación	101 - 102
C. Estimado del Costo de Producción	102 - 104
1. Materias Primas	102
2. Mano de Obra	102 - 103
3. Mantenimiento	103
4. Abastecimiento de Planta	103
5. Servicios	103

	Pags.
6. Gastos Indirectos	103
7. Depreciación	104
D. Breve Balance Económico	104
E. Indices de Evaluación Económica del Proyecto	105
1. Retorno antes de los impuestos	105
2. Retorno después de los impuestos	105
3. Tiempo de Recuperación	105
V) Conclusiones y Recomendaciones	
A. En el Aspecto Técnico	106
B. En el Aspecto Económico	106 - 107
VI) Anexos	
A. Bibliografía	108

I) Generalidades

A) Historia de los Alúmenes:

Se tuvo conocimiento de los alúmenes unos 1,000 años A. de C., en forma natural y en un estado muy impuro, resaltando intensamente su carácter astringente.

Durante estos primeros tiempos de su aparición, tuvo un gran valor económico. A manera de anécdota, presentamos lo siguiente: "Herodoto, célebre historiador griego, relata que Amasis, rey de Egipto, unos 500 años antes de Cristo, contribuyó con un millón de talentos de alúmenes a la gente de Delfos como una suscripción para persuadirlos para reconstruir su templo que había sido destruido por el fuego".

Asimismo, en las crónicas antiguas se mencionan gran número de lugares donde podía conseguirse esta sustancia, determinando además variedades, algunas de las cuales eran usadas en teñido y en medicina. Así tenemos que Plinio relata la presencia de alúmenes de colores claros y de colores oscuros, éstos últimos debido a la presencia de fierro como principal impureza.

De esta forma, se puede suponer que las diferentes variedades de alúmenes eran mezclas más o menos impuras de sulfatos de aluminio y fierro.

Durante algún tiempo en la Antigüedad, el alumen de Egipto fue considerado como el mejor de todos aquellos existentes.

Sin embargo, la isla de Milo fue también famosa por su alumen. Los romanos contaban con las islas de Lipari y Stromboli como 2

grandes reservas o depósitos de alumen natural, e incluso lo exportaban.

En lo que respecta a su origen, no se conoce con exactitud cuando apareció por primera vez, pero se supone que provino del Lejano Oriente, traído en forma de "especie" por los navegantes y aventureros.

Como lógicamente se tiene que suponer, el alumen natural, exhaustivamente extraído desde los primeros tiempos, fue paulatinamente agotándose, de modo que el hombre se vio obligado a esforzarse para producirlo artificialmente, y es en este momento donde empieza una nueva etapa en su historia y que se conoce, en términos generales, como la etapa de producción tecnológica.

Algunos afirman que fue primeramente manufacturado en Europa por Bartolomeo Pardi, en la isla de Ischia, más o menos en el año 1460.

Seguidamente, en el periodo comprendido entre 1460 y 1470, John di Castro, considerado como el inventor del alumen fundó una factoría al noroeste de Tolja, cerca de Civita Vecchia.

Posteriormente, la factoría de Tolja pasó a poder de la Iglesia, y fue tanto la importancia que alcanzó el alumen que la Iglesia de Roma emitió bulas papales mediante las cuales prohibía que la gente comerciase con el alumen bajo pena de excomunión para los transgresores.

Una forma de fabricar el alumen en aquella época era de la siguiente manera:

"Las piedras eran calcinadas en un horno, luego se agregaba sobre estas piedras calientes una gran cantidad de agua, y después de que se disolvían lentamente, el agua era evaporada en grandes recipientes, después de lo cual se vertía en recipientes de madera, donde, evaporando por grados, resultaba un alumen de la más perfecta calidad"

El alumen conocido en la Antigüedad no era el mismo que se conoce actualmente, ya que probablemente el primero era sulfato de aluminio contaminado con sulfato de fierro, mientras que el alumen es una sal doble que contiene sulfato de potasio o cualquier otro sulfato similar.

En un principio, el alumen era clasificado con las vitriolas (sulfatos ferroso y cúprico), pero posteriormente se establecieron sus diferencias fundamentales.

En el año de 1684, M. Ettmüller descubrió que el alumen podría ser obtenido al hacer actuar ácido sulfúrico sobre arcilla.

Luego se pensó que la "tierra calcarea" podría ser una buena fuente para producir alumen, debido a su naturaleza misma. Seguidamente se pensó que podría ser la denominada tierra argilosa. Sin embargo, Marggraf en 1754, mostró que la fuente principal de materia prima era una sustancia definida, bastante diferente de la caliza, que lo contienen todas las arcillas naturales y de la cual puede ser extraída utilizando ácido sulfúrico, y dejando en el residuo sin lixiviar toda la sílice.

Con el correr del tiempo, se encontraron mejores materias primas,

constituyéndose la bauxita en una de las más importantes. Posteriormente se mejoraron aún más los procedimientos tecnológicos de producción, obteniéndose cada vez un alumen más puro. Actualmente, su producción es bastante importante debido a los múltiples usos que tiene.

B) Propiedades y Usos del Sulfato de Aluminio:

1) Propiedades Generales:

Se ha medido la solubilidad del sulfato de aluminio en agua entre 0 y 100°C y se han expresado los resultados en gramos de $Al_2(SO_4)_3$ por 10 gramos de solución saturada.

Así tenemos:

Temp. (°C)	0	10	20	40	60	80	100
Solubilidad	23.8	25.1	26.7	31.4	37.2	42.2	47.1

La fase sólida sobre el rango completo es $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18 H_2O$.

Se hicieron pruebas para explorar el sistema a temperaturas todavía más bajas con el objeto de conocer que hidratos existen a esas temperaturas, y se obtuvieron los siguientes resultados:

El octodecahidrato es la fase sólida hasta el eutéctico a -4°C. Si se expresan los resultados tal como se hicieron anteriormente, tendremos lo siguiente:

Temp. (°C)	-1.02	-1.43	-2.04	-2.65	-2.85	-4.00	-7.73
Solubilidad	8.09	10.7	14.3	17.5	19.2	23.1	24.8

También se han hecho mediciones de presión de vapor mientras

el agua es gradualmente retirada y se encontraron transiciones bien marcadas del pasaje octodecahidrato a hexadecahidrato, de hexadecahidrato a dodecahidrato, de dodecahidrato a dihidrato, y de dihidrato a sal anhidra.

De acuerdo a Karsten, cuando se calienta sulfato de aluminio hidratado, primero se funde en su agua de cristalización, se entumece y finalmente deja una masa porosa de sulfato anhidro $Al_2(SO_4)_3$.

Stromeyer encontró que si se le continúa calentando pierde todo su contenido de SO_3 sin fundirse. Friedrich afirma que esta descomposición comienza a unos 770°C.

Wöhler y sus colaboradores encontraron que la presión parcial del SO_3 al momento de descomponerse el sulfato de aluminio es:

Temperatura (°C)	580	620	660	680	700	720	740
Presión del SO_3 (mm.)	20.4	30.2	47.0	54.0	72.2	95.5	154.5
Temperatura (°C)	572	621	681	702	720	742	748
Presión total (mm.)	28	51	120	180	261	480	692

Si se calienta durante 4 horas, bajo llama de un mechero Bunsen, una muestra de sulfato de aluminio, el residuo será igual a $2Al_2O_3 \cdot SO_3$.

La gravedad específica de una solución acuosa de sulfato de aluminio purificado (40% de agua), referida al agua a 4°C es como sigue:

% de $Al_2(SO_4)_3$	1	5	10	15	20	25
15	1.0170	1.0569	1.1071	1.1574	1.2074	1.2572
Gravedad Específica a:						
25	-	1.0503	1.1022	1.1522	1.2002	1.2483
35	-	1.0450	1.0960	1.1460	1.1920	1.2407
45	-	1.0356	1.0850	1.1346	1.1801	1.2295

2) Propiedades Particulares de Algunos Sulfatos de Aluminio

<u>Propiedad</u>	<u>$Al_2(SO_4)_3$</u>	<u>$Al_2(SO_4)_3 \cdot 9H_2O$</u>	<u>$Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$</u>
Peso Fórmula	342.12	504.27	666.40
Punto de Fusión	770.0°C	se descomp. fácilmente	86.5°C
Gravedad Específica	2.71	-	-
Solubilidad	en agua, ácido diluido y en alcohol	en agua, ácido y alcalis	en agua hasta cierto grado insoluble en alcohol
Hábitus	-	-	Se presenta en forma de mineral alumogenita.

3) Usos:

- a) En el tratamiento del agua para el consumo humano, como coagulante de los sólidos en suspensión.
- b) En la industria del papel (fabricación de la celulosa)
- c) En la industria química, para la fabricación de estearatos.
- d) En la industria petroquímica (refinación del petróleo)
- e) En equipos de extinguidores comerciales.
- f) En la industria textil, como mordiente o fijador de tintes (teñido de telas).

g) En la industria de la construcción, para el fraguado del yeso.

h) En la industria farmacéutica, como astringente y antiséptico para la piel.

C) Datos Estadísticos

En el Perú hay una sola planta de sulfato de aluminio que pertenece a la Rayón Celanese Peruana S.A. Dicha planta tiene una capacidad para 20,000 T.M. por año. Su producción en el año 1971 fue de 8,900 T.M.

No se producen ni importaciones ni exportaciones de este producto. La Planta de la Rayón Celanese utiliza bauxita, hidróxido de sodio y ácido sulfúrico como materias primas.

En lo respecta a los precios, tenemos lo siguiente:

- En el Perú: \$3.06 por kilo de tipo A.

4.20 " " " " B.

- En Chile: 1.00 escudos por kilo de cake de alúmina con 14% de Al_2O_3 .

1.90 escudos por kilo del refinado con 17% de Al_2O_3 .

- En Colombia: 1.20 pesos por kilo. Base de arcilla.

2.00 pesos por kilo. Base bauxita.

- En Estados Unidos: \$73.97 por T.M. al 17% Al_2O_3 . Grado comercial en sacos.

\$68.97 por T.M. al 17% de Al_2O_3 . Grado comercial al granel.

\$101.25 por T.M. libre de hierro en sacos.

II) Tecnología General

A) Estudio de Materia Prima:

La materia prima principal es el aluminio metálico que en forma de chatarra y a razón de 10 toneladas por mes es proporcionado por la Planta Electrolítica de Zinc. Este aluminio está en forma de retazos y planchas pequeñas, que necesitan adecuarse para el proceso. La forma como se convierten estas planchas y retazos grandes a partículas pequeñas es la siguiente: Se funde el aluminio y luego se vierte con un chorro muy fino, insuflando perpendicularmente a dicho chorro una corriente de aire a presión que atomiza al aluminio. En la compañía se emplea un método similar para producir perdigones de plomo.

En lo que respecta al ácido sulfúrico, éste es producido por la Compañía, y por lo tanto no habrá problemas de suministro. Además, es de muy buena calidad y bastante barato.

En lo concerniente al ácido clorhídrico que es utilizado como disolvente, habría que comprarlo de Lima, pero puede ser del tipo comercial, ya que aquí se purificaría. Además solo se realizaría una compra, ya que este ácido se regenera.

B) Métodos o Procedimientos de Manufactura del Sulfato de Aluminio

Como en todo proceso, generalmente un producto puede obtenerse invariablemente de 2 maneras: en el laboratorio y en la industria (a gran escala).

En nuestro caso, cualesquiera que sea el procedimiento que se utilice, deberá contar con una fuente de aluminio (materia prima) inicial, que para los procesos en gran escala podrá ser mineral de aluminio (bauxita), en tanto que para los procedimientos de laboratorio podrá ser una sustancia relativamente pura.

1) Empleando arcilla como materia prima:

a) La arcilla de china se calcina con un calor moderado hasta que pierda casi todo su contenido de agua. Luego se pulveriza y tamiza a tamaño muy fino, mezclándola con una cantidad algo menor que la teórica de ácido sulfúrico de 1.45 á 1.50 de densidad, y se calienta con vapor de agua para iniciar la reacción, que se hace luego muy violenta. La masa se hincha y persiste el aumento de volumen cuando cesa la reacción. Esta masa contiene casi todas las impurezas y un 2 á 3% de ácido libre. Luego, esta masa pastosa y espesa se diluye con agua caliente antes de que se enfríe. A continuación, se decanta y filtra para separar las impurezas insolubles. Seguidamente, se procede a la concentración por evaporación de la solución de sulfato.

b) Empleando bauxita como materia prima: La bauxita tiene como fórmula $Al_2O_3 \cdot 2H_2O$, pero en general el número de moléculas puede variar de 1 á 3. El contenido de Al_2O_3 soluble puede llegar hasta 57%, mientras que el Fe_2O_3 alcanzará más o menos un 1%.

La mena cruda es triturada y molida a polvo muy fino (prácticamente todo que pase por la malla 200) y luego lixiviada con ácido sulfúrico de 60°Bé.

Esta operación es llevada a cabo en vateas revestidas con plomo y equipadas con agitadores de paleta, o si se emplea una forma continua, utilizando equipo tal como el agitador Dorr. La proporción de los materiales entrantes es tal, de modo que haya siempre un exceso de 0.1 á 0.2% de Al_2O_3 soluble. La mezcla es mantenida entre 105 y 110°C de temperatura, por medio de un sistema de vapor. Se requieren de 15 á 20 horas para completar la reacción, y al final de este tiempo, la solución contiene parte del material insoluble, en un estado muy finamente dividido. La mayor parte del fierro ha sido oxidado a su condición de férrico, especialmente si se ha utilizado aire para la agitación. Si la operación es llevada a cabo en "batches" (en forma discontinua), se permite que la carga se sedimente, para sacar luego el líquido que sobrenada y lavarlo por 2 o 3 veces. Las soluciones de lavado se mezclan con la solución fuerte o cargada. Una solución final más concentrada puede ser obtenida si se utiliza un sistema de decantación en contracorriente para el lavado. La densidad del licor de cualquiera de los 2 procesos puede variar entre 25 y 30°Bé. Para poder extraer el material suspendido finamente dividido se tiene que emplear alguna sustancia

coagulante, la cual flocculará en una solución ácida y agrupará a los sólidos en suspensión. También se puede añadir alguna otra sustancia que reduzca el fierro a su condición de ferroso. Para este propósito se utilizan materiales tales como: sulfuro de bario, sulfuro de sodio, hidrógeno sulfurado, bisulfito de sodio, o anhídrido sulfuroso. Después de la clasificación, reducción y sedimentación, el líquido claro está listo para la etapa de concentración. Usualmente, la evaporación es llevada a cabo en tanques de madera abiertos, revestidos con plomo, y que contienen un sistema de calentamiento por medio de vapor.

Generalmente, la solución es concentrada a 62°Bé, densidad a la cual solidifica a más o menos 80°C.

Podrían utilizarse evaporadores de plomo moldeado de múltiples efectos si se tuviera cuidado de terminar la solución en el primer efecto, a una temperatura lo suficientemente por encima de su punto de congelamiento, de modo que no se produzca ningún peligro de solidificación en el evaporador o en las tuberías del sistema de vapor. Seguidamente, la solución concentrada es transportada a unos recipientes de fierro o a mesas enfriadoras.

- 2) Métodos usados en el Laboratorio: Como sucede casi siempre, los métodos de laboratorio son los más numerosos, pero muchas veces no pasan de esa etapa debido a su improcedencia en el

aspecto económico. Los principales son los siguientes:

a) Ebullición del alum de amonio con agua regia hasta expulsar todo el amoniaco presente. A continuación, se somete a esta solución cargada a una concentración al vacío, hasta que se formen cristales, y se añade solución de tiempo en tiempo, para provocar un mayor crecimiento de los cristales formados inicialmente.

b) Calentando bauxita con una mezcla de aire, vapor y dióxido de azufre, a una temperatura que no exceda los 800°C. El problema que aquí se presenta es como separar el sulfato férrico del sulfato de aluminio por cristalización, pero es posible hacerlo si la sal férrica se reduce a sulfato ferroso por medio de hidrógeno sulfurado o de dióxido de azufre.

Seguidamente, se mencionan diferentes métodos por medio de las cuales es posible obtener varias especies de sulfato hidratados. Así tenemos:

c) El sulfato de aluminio heptacosihidratado, $Al_2(SO_4)_3 \cdot 27H_2O$, se forma cuando una solución acuosa saturada de sulfato de aluminio se expone al frío invernal, o si el hidrato ordinario se forma como una especie de masa espesa con agua y es enfriada por debajo de 9.5°C.

d) El sulfato de aluminio heptadecahidratado, $Al_2(SO_4)_3 \cdot 17H_2O$, se obtiene de la solución producida al saturar incompletamente ácido sulfúrico con hidróxido de aluminio gelatinoso.

- e) El sulfato de aluminio hexahidratado, $Al_2(SO_4)_3 \cdot 6H_2O$, se forma como un polvo blanco, cuando se calienta sulfato de aluminio por un tiempo largo con ácido sulfúrico concentrado, lavado con agua helada y secado a $110^{\circ}C$.
- f) El sulfato de aluminio decahidratado, $Al_2(SO_4)_3 \cdot 10H_2O$, precipita en forma de cristales tubulares, cuando se añade alcohol a una solución acuosa diluida de sulfato. Ambos compuestos hidratados forman el octodecahidrato al exponerlos a una atmósfera húmeda.
- g) El sulfato de aluminio octodecahidratado, $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$, cristaliza de sus soluciones en ácido clorhídrico en bonitos cristales tubulares, cuando se expone la solución concentrada a un ambiente frío.

3) Método adoptado en el presente trabajo:

El método que se emplea aquí en este trabajo de tesis es bastante diferente de los procedimientos clásicos, ya que emplea aluminio metálico y ácido clorhídrico como materias diferentes a los otros procesos.

En lo que respecta a las operaciones y procesos unitario, estos son casi similares a los de los procedimientos clásicos.

Lo mismo sucede en el diagrama de flujo.

C) Tecnología de las Operaciones Unitarias y de los Procesos Unitarios

1) Aspectos teóricos.

Los puntos más importantes a considerar en este acápite son

los siguientes:

- a) El fenómeno químico que se produce durante el proceso de disolución del aluminio metálico en solución de ácido clorhídrico.
- b) El fenómeno que se lleva a cabo durante la evaporación de la mezcla de soluciones de cloruro de aluminio y de ácido sulfúrico.

Los procesos que se llevan a cabo tanto en los condensadores (transmisión de calor) como en la torre de absorción son meramente físicos y por lo tanto, serán tratados oportunamente en su correspondiente diseño.

A) Descripción del Proceso que ocurre en el mezclador:

En el recipiente mezclador se cargan tanto el aluminio metálico (en forma de partículas pequeñas) como una solución de ácido clorhídrico 6N. La reacción que se produce es la siguiente:



Los correspondientes productos de la reacción son: una solución de cloruro de aluminio e hidrógeno gaseoso que se escapa al ambiente.

Durante las pruebas experimentales se pudo observar que una vez que se ha añadido el aluminio metálico a la solución de ácido clorhídrico, el metal no reacciona inmediatamente, sino que demora unos 10 minutos en hacerlo. El desarrollo de la reacción se conoce por una efervescencia

con la correspondiente evolución de hidrógeno gaseoso. La razón por la cual el aluminio metálico no reacciona inmediatamente se debe a que todavía no se ha acumulado una suficiente concentración de iones hidrógeno y cloruro en la interfase sólido - líquido.

Una vez que la concentración alcanza un valor suficiente (fuerza directora de la reacción) es que recién comienza la reacción. La velocidad es bastante apreciable durante los primeros minutos, pero decae a medida que pasa el tiempo por la eliminación paulatina de los iones hidrógeno, en forma de hidrógeno gaseoso. Generalmente, ya no se disuelve más aluminio cuando la concentración ácida equivale a un pH de 1.0 ó 1.2.

Termodinámica del Proceso: Como es bastante conocido, la termodinámica es una parte del conocimiento que nos permite determinar la probabilidad de que una reacción se produzca en un sentido determinado. Además, nos permite precisar las condiciones de equilibrio que se producen a cada valor de temperatura. Aprovechando estas ventajas es que procederemos a efectuar el cálculo correspondiente.

La ecuación de disolución, como vimos anteriormente, es la siguiente:



para no trabajar con coeficientes fraccionarios, se multiplicará por 2 toda la ecuación, de manera que resultará de

la siguiente forma:

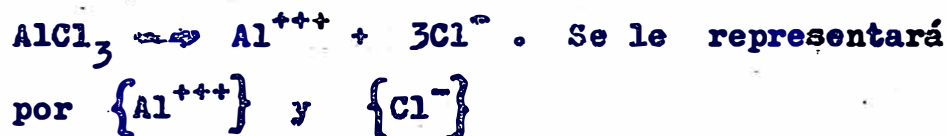


El estado de agregación en que se encuentran las sustancias anteriores es un punto muy importante que no se puede dejar de lado, de modo que tendremos:

Al: se encuentra al estado sólido, en forma de partículas pequeñas. Se le representará por $\langle \text{Al} \rangle$

HCl: se encuentra en forma de solución diluida. Se le representará por $\{ \text{HCl} \}$

AlCl_3 : Se encuentra en solución, de modo que podemos considerar como que se encuentra ionizado, o sea:



H_2 : Se encuentra en forma gaseosa. Se le representará por (H_2)

de manera que la ecuación principal podremos escribirla así:



Los valores termodinámicos correspondientes a estas sustancias, con su respectivo estado de agregación se presentan a continuación:

<u>NO</u>	<u>Sustancia</u>	<u>H_{298}° (Kcal/mole)</u>	<u>S_{298}° (cal/grado/mole)</u>
1	$\langle \text{Al} \rangle$	0	6.77
2	$\{ \text{HCl} \}$	- 40.023	13.20
3	$\{ \text{Al}^{+++} \}$	- 125.400	- 74.90
4	$\{ \text{Cl}^- \}$	- 40.023	13.20
5	(H_2)	0	31.21

Las ecuaciones para el cambio de la energía libre son las siguientes:

$$\Delta G_T^0 = \Delta(\Delta H_T^0) - T(\Delta S_T^0)$$

$$\text{donde: } \Delta(\Delta H_T^0) = \sum(\Delta H_T^0)_P - \sum(\Delta H_T^0)_R$$

$$\text{y } \Delta S_T^0 = \sum(S_T^0)_P - \sum(S_T^0)_R$$

Como todo el cálculo se hará a temperatura ambiente (298°K) entonces el subíndice T adopta el valor de 298°K y a la energía libre resultante se le conoce como energía libre standard. Los subíndices P y R en las fórmulas anteriores representan a los productos y reactantes respectivamente. De manera que si reemplazamos en la ecuación para la energía libre, tendremos la siguiente relación total.

$$\Delta G_T^0 = \left[\sum(\Delta H_T^0)_P - \sum(\Delta H_T^0)_R \right] - T \left[\sum(S_T^0)_P - \sum(S_T^0)_R \right]$$

Al reemplazar en la fórmula anterior los respectivos valores numéricos de las entalpías y entropías, es necesario tener muy en cuenta los coeficientes de las distintas sustancias. Reemplazando tendremos:

$$\begin{aligned} \Delta G_{298}^0 = & \left\{ 2 \times (-125.4) + 6 \times (-40.023) + 3 \times 0 - \left[2 \times 0 + \right. \right. \\ & \left. \left. 6 \times (-40.023) \right] \right\} \\ & - T \left\{ 2 \times (-74.9) + 6 \times (13.2) + 3 \times (31.21) - \right. \\ & \left. \left[2 \times (6.77) + 6 \times (13.2) \right] \right\} \end{aligned}$$

Resolviendo la ecuación anterior, se consigue el siguiente resultado:

$$\Delta G_{298}^0 = - 250,800 + 69.71 T$$

Si analizamos la relación anterior veremos que al incrementar la temperatura absoluta (en grados Kelvin) la energía libre tiende a hacerse menos negativa, disminuyendo por lo tanto la probabilidad de que la reacción se realice de izquierda a derecha. Sin embargo, esta variación no es muy significativa para el rango de temperaturas de trabajo, ya que siempre permanece una energía libre del orden de las 200,000 calorías, que hace que la reacción se verifique de izquierda a derecha (altamente irreversible).

Analizando la reacción desde el punto de vista calórico, vemos que el calor de reacción es de - 250,800 calorías, lo que significa que la reacción es altamente exotérmica. La cantidad de calor generada por cada gramo de aluminio será:

$$Q = \frac{250,800 \text{ cal}}{54 \text{ grs. Al}} = 4,780 \text{ cal/gramo}$$

Cinética del Proceso: La cinética es una rama de la Química que se ocupa del estudio de velocidades de reacciones. La velocidad de una reacción química se expresa cuantitativamente como la masa o moles de un producto o reactante, producido o consumido por unidad de tiempo.

En los estudios de velocidad de reacción es conveniente distinguir entre 2 tipos de sistemas. En uno, los procesos físicos de difusión son importantes en la secuencia de una reacción química y física que determine la veloci-

dad total de la reacción. En el segundo, tales procesos no son importantes.

En general, siempre que la reacción involucre a más de una fase (ya sea como uno de los reactantes o productos o como el catalizador) o que una mezcla en reacción de una sola fase no esté perfectamente mezclada de manera que no sea esencialmente homogénea, la difusión puede ser importante. En nuestro caso, el sistema en estudio es heterogéneo, ya que involucra 2 fases (una líquida, que es la solución de ácido clorhídrico y la otra sólida que es el aluminio metálico), y por lo tanto, los procesos de difusión pueden ser importantes.

Un sistema heterogéneo líquido-sólido involucra el siguiente mecanismo:

Una difusión de los iones hidrógeno y cloro hacia las partículas de aluminio metálico, concentrándose cerca de la interfase líquido-sólido. La reacción no se lleva a cabo hasta que no se acumule una concentración suficiente. Los límites entre las 2 fases no son superficies en el sentido matemático estricto, pero son regiones muy delgadas, en las cuales las propiedades cambian en forma abrupta de una fase homogénea a la otra.

El paso siguiente es la reacción misma de disolución del aluminio. Seguidamente, tiene lugar una difusión de los iones de aluminio (productos de la reacción), que tienden

a alejarse de la interfase para que pueda continuar la re
acción.

De todos los fenómenos físicos y químicos de que consta una reacción, el más lento es el que determina la velocidad total del proceso.

Para analizar los datos cinéticos y determinar el orden de la reacción y su constante de equilibrio, se va a emplear el método o procedimiento de integración, que consiste en integrar la ecuación que se supone sea la que represente la velocidad de la reacción para cualquier tiempo, utilizando en este caso, la concentración de ácido clorhídrico. Para efectuar este cálculo, se han considerado los siguientes datos experimentales:

Nº	Tiempo (<u>min.</u>)	Concentración HCl <u>gr/l</u>	Volumen <u>Soln(ml.)</u>	Contenido HCl (<u>grs</u>)
1	15	203.1	590	119.8
2	30	162.2	580	94.1
3	45	121.4	560	68.0
4	60	78.5	550	43.2

Los valores de los volúmenes decrecen a medida que transcurre el tiempo debido a las pérdidas por evaporación del agua. De modo que para determinar el verdadero contenido de ácido clorhídrico es necesario multiplicar el valor titulado por el volumen que ocupaba en ese momento.

En la determinación del orden de la reacción y de la cons

tante específica se va a considerar como variable a la concentración o contenido de ácido clorhídrico y por tal razón se le denominará como x .

Se han hecho cálculos suponiendo como si la reacción fuese de 1er, 2º o 3er. orden, encontrándose que cuando se supuso que era de 2º orden, la constante K (constante específica de la reacción) se mantenía más o menos en un valor constante. En los otros casos, la variación de la constante mostró siempre una tendencia.

Si llamamos x al contenido de ácido clorhídrico en cualquier instante, entonces matemáticamente la ecuación de 2º orden se expresará de la siguiente forma:

$$\frac{d x}{d t} = - K x^2$$

El signo negativo indica que x disminuye a medida que transcurre el tiempo. Integrando la ecuación anterior tendremos:

$$\frac{d x}{x^2} = - K dt \quad , \quad \text{donde} \quad \int x^{-2} d x = - \int K dt$$

$$\int x^{-2} dx = - \int K dt + c .$$

$$\frac{x^{-2+1}}{-2+1} = - Kt \quad \text{y finalmente} \quad K = \frac{1}{xt}$$

Reemplazando los valores de tiempo (en minutos) y concentración (gramos) en la expresión anterior, conseguiremos formar el siguiente cuadro:

<u>Nº</u>	<u>Tiempo (min.)</u>	<u>Concentración (gramos)</u>	<u>K (grs. - min)⁻¹</u>
1	15	119.8	3.58×10^{-4}
2	30	94.1	3.54×10^{-4}
3	45	68.0	3.24×10^{-4}
4	60	43.2	3.86×10^{-4}

Un valor promedio puede hallarse simplemente tomando la media aritmética de esas cantidades:

$$\bar{K} = \frac{\sum_{i=1}^4 K_i}{4} = \frac{14.25 \times 10^{-4}}{4} = 3.56 \times 10^{-4} \text{ (grs.-min)}^{-1}$$

Para determinar la constante de velocidad K en función de moles-gramo de ácido clorhídrico, deberemos efectuar la siguiente variación:

$$3.56 \times 10^{-4} \text{ (grs.-min.)}^{-1} \times 36.5 \frac{\text{gramos}}{\text{mole}} = 1.3 \times 10^{-4} \text{ (mol-min)}^{-1}$$

Las unidades de la constante específica varían, según se trate de una reacción de primer, segundo o tercer orden. En el caso de una reacción de primer orden, las unidades de la constante serán: (tiempo)⁻¹; y para nuestro caso, las unidades son: (concentración - tiempo)⁻¹. Como puede deducirse fácilmente, cuanto mayor es el orden de una reacción, ésta se realizará con una mayor rapidez. En resumen, se puede decir que nuestra reacción es bastante rápida, a pesar de llevarse a cabo en un sistema heterogéneo.

Estequiometría del Proceso: Esta forma del conocimiento nos permite determinar la parte cuantitativa del proceso,

esto es, cuanto de producto se obtiene para una cantidad dada de reactantes, lo que nos permitirá apreciar si la reacción alcanza equilibrio o se detiene solamente cuando todos los reactantes ya se han consumido.

Como la reacción principal es: $\text{Al} + 3\text{HCl} \rightarrow \text{AlCl}_3 + 3/2 \text{H}_2$,

la descripción del sistema es la siguiente:

Una mol (o átomo) de aluminio reacciona con 3 moles de ácido clorhídrico para producir una mol teórica de cloruro de aluminio (ya que en realidad lo que se produce son los iones equivalentes) y una mol y media (1.5) de hidrógeno gaseoso.

En lo que respecta a una relación ponderal, la descripción sería la siguiente:

27 gramos de aluminio reaccionan con 109.5 gramos de ácido clorhídrico para producir 133.5 gramos de cloruro de aluminio (en solución) y 3 gramos de hidrógeno gaseoso. Toda esta reacción se lleva a cabo en un medio acuoso.

Ambas descripciones anteriores corresponden a un sistema ideal, ya que se considera que se lleva a cabo la reacción con un 10 % de conversión.

En todas las pruebas de laboratorio realizadas, sin embargo, siempre quedó algo de aluminio metálico sin reaccionar, que representaba en promedio, generalmente un 7% del aluminio inicialmente cargado, lo que significa que la reacción procede hasta más o menos un 93% de conversión. De

acuerdo a las curvas cinéticas, cuando la reacción alcanza este grado de conversión, se presenta un equilibrio que no permite que se siga disolviendo el aluminio. La disolución total del aluminio podría alcanzarse si se trabajase con un exceso de ácido, lo que no sería muy conveniente, ya que se incurriría en otro problema. Quizás un exceso adecuado podría ser de un 3 á 5%.

De modo que si consideramos un 93% de conversión, entonces la descripción ponderal real del sistema sería: (tomando como base 27 gramos de aluminio o sea una mol).

25.1 gramos de aluminio reaccionan con 101.8 gramos de ácido clorhídrico para producir 124.2 gramos de cloruro de aluminio en solución y 2.7 gramos de hidrógeno gaseoso.

Como vimos anteriormente, la reacción es altamente irreversible, por lo que no existe el peligro de que se formen nuevamente las sustancias reaccionantes.

En resumen, podremos decir que la reacción alcanza hasta un 93% de conversión debido a su alta irreversibilidad que no permite que se establezca un equilibrio previo.

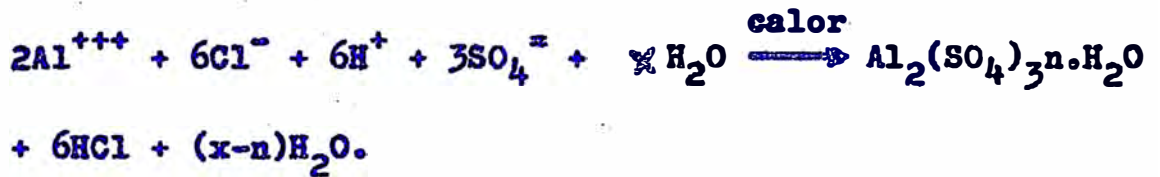
B) Descripción del proceso que ocurre en el evaporador:

En el evaporador se alimenta la solución clara de cloruro de aluminio y una cantidad precisamente calculada de solución de ácido sulfúrico (determinada en base al peso del aluminio disuelto).

Como puede observarse, es una reacción homogénea puesto

que se lleva a cabo en una sola fase líquida.

El sistema se puede representar por la siguiente reacción:



El principal objetivo de este proceso es la eliminación por evaporación del agua en forma de vapor y del cloruro de hidrógeno gaseoso, dejando en el evaporador un residuo casi sólido de sulfato de aluminio hidratado.

La expulsión del agua en forma de vapor y del cloruro de hidrógeno es casi selectiva, ya que primero se elimina ma yormente vapor de agua y posteriormente, casi al finalizar el proceso, el cloruro de hidrógeno.

Cuando se ha eliminado casi todo el vapor de agua, la se lución resultante va tornándose cada vez mas amarilla (por su aumento de concentración en cloro) y a medida que sigue transcurriendo el tiempo, se vuelve blanquesina, in dicando con eso la eliminación del cloruro de hidrógeno.

El punto final del proceso se reconoce cuando queda un re siduo sólido blanquesino que es el sulfato de aluminio hi dratado.

La temperatura del evaporador debe estar en un mínimo de 85°C, punto donde empieza la evaporación del agua.

El sulfato de aluminio hidratado obtenido al final de esta etapa contiene más o menos un 0.5% de cloro que no ha podido ser expulsado durante la evaporación.

Como se trata de un proceso de expulsión por evaporación de unas sustancias volátiles, entonces un aumento de temperatura del sistema lo favorecería notablemente, ya que la correspondiente expulsión será más rápida.

El otro aspecto muy importante durante esta etapa es la formación del sulfato de aluminio. Felizmente, esta sustancia (ya sea anhidra o hidratada) tiene una gran energía libre negativa de formación (del orden de las 800,000 calorías) por lo que existe una máxima probabilidad de que se forme.

En el aspecto estequiométrico, tenemos que todo el aluminio disuelto se combina con el ión sulfato del ácido sulfúrico, de acuerdo a su relación en la ecuación, por lo que se debe utilizar siempre la cantidad necesaria requerida.

2. Parte Experimental

a) Introducción: En general, los sulfatos de aluminio y cualquier otro metal alcalino pertenecen al grupo denominado alúmenes. Pero actualmente, la usanza comercial ordinaria reconoce como alúmenes sólo al sulfato de aluminio octadecahidrato $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18 H_2O$. Los sulfatos dobles de aluminio o cromo son comercialmente conocidos como "alúmenes cristalinos", o por el nombre específico del metal alcalino utilizado.

El alum es usado principalmente en la industria del papel

y comocoagulante para la purificación del agua. Estos 2 usos representan respectivamente 35 y 55 % de la producción total.

La mayoría del sulfato de aluminio para el consumo en la industria utiliza a la bauxita y a minerales arcillosos de aluminio como materia prima. Este método clásico consiste en atacar directamente los minerales arcillosos con ácido sulfúrico concentrado (del orden de 50% B_é). Después de la digestión, se procede a concentrar la solución de sulfato de aluminio resultante hasta una densidad determinada, para luego cristalizarla. La principal impureza del sulfato de aluminio producido por éste método es el fierro.

b) Pruebas Preliminares: El primer intento para producir sulfato de aluminio fue tratar la chatarra de aluminio (en forma de partículas pequeñas) directamente con ácido sulfúrico concentrado y en proporción estequiométrica. Pero la experiencia no dio buenos resultados, ya que el aluminio prácticamente no fue atacado por la solución concentrada de ácido frío.

Seguidamente, se hicieron pruebas con ácido sulfúrico caliente (a una temperatura de más o menos 50°C), pero tampoco dieron resultados positivos. De tal forma, el problema que se planteaba era encontrar un disolvente que atacara la película de Al_2O_3 que se forma en el aluminio

metálico cuando éste es expuesto al aire y que lo previene de una posterior corrosión.

De esta manera se efectuaron experimentos con ácido clorhídrico. Primero se utilizó una concentración baja (del orden de unos 20 gramos/litro). Estas pruebas fueron más que todo cualitativas, pero se lograron resultados satisfactorios, ya que el contenido de ácido disminuyó apreciablemente a medida que transcurría el tiempo y se añadió más aluminio. El aluminio utilizado está en la forma de pequeñas virutas, obtenidas al introducir una broca dentro de una barra de aluminio.

En vista del éxito alcanzado con el ácido clorhídrico se programó una experiencia cuantitativa sobre el proceso de disolución.

Los resultados de dicha prueba aparecen a continuación:

<u>Nº</u>	<u>Temp. °C</u>	<u>Tiempo (min.)</u>	<u>Soln. de Na₂CO₃ (ml.)</u>	<u>Concent-ácida grs./litro</u>	<u>pH</u>
1	55	0	26.0	275.0	-
2	53	15	23.1	244.3	-
3	55	45	20.1	212.6	-
4	56	75	16.6	175.6	-
5	58	105	13.2	139.6	-
6	60	135	9.3	98.3	-
7	59	165	5.3	56.0	-
8	50	195	4.0	42.3	-
9	50	225	2.5	26.4	-
10	52	255	2.2	23.2	-

<u>Nº</u>	<u>Temp. °C</u>	<u>Tiempo (min.)</u>	<u>Soln. de Na₂CO₃ (ml.)</u>	<u>Concent-ácida grs./litro</u>	<u>pH</u>
11	52	285	1.9	20.1	-
12	50	315	1.5	15.8	-
13	50	345	1.0	10.5	-
14	42	375	-	-	0.7
15	56	400	-	-	0.8

Asimismo, se incluye un gráfico donde se plotean las concentraciones ácidas (en gramos/litro) versus los tiempos. Como puede verse en el cuadro anterior, la disolución del aluminio en el ácido clorhídrico es bastante marcada. Al cabo de aproximadamente unas 5 horas se ha disuelto casi todo el aluminio. La cantidad de aluminio disuelto fue de 77.3 grs. Además la concentración inicial de ácido clorhídrico fué de 275.0 grsmos/litro, con un total de 1,500 ml.

La ecuación que representa a este proceso de disolución es la siguiente:



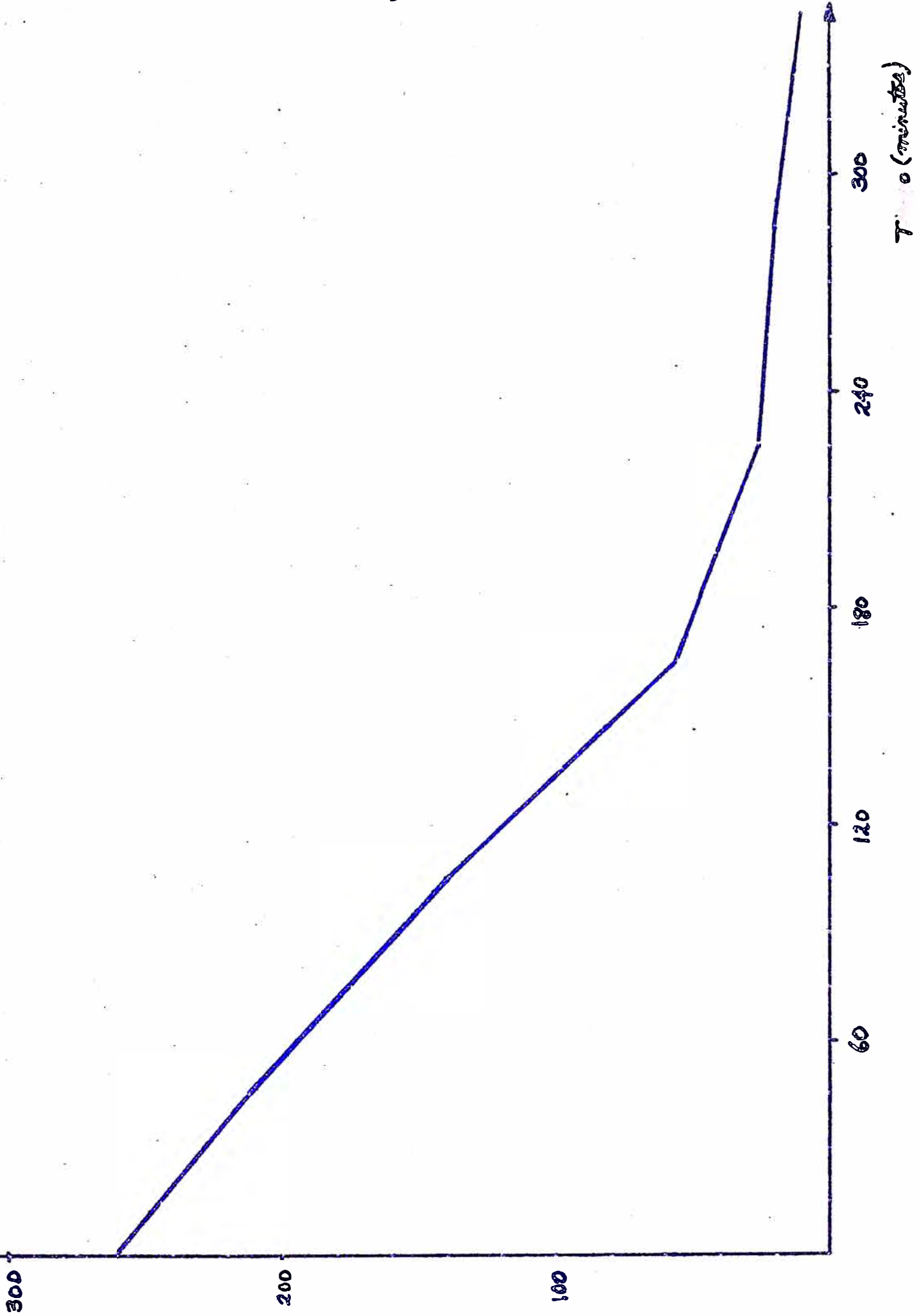
Si calculamos la cantidad de ácido clorhídrico HCl (en gramos) que se necesitan para disolver los 77.3 gramos de aluminio, tendremos lo siguiente:

$$\text{HCl (para disolver 77.3 grs. de aluminio)} = \frac{77.3 \times 109.5}{27.0} = 313.0 \text{ gra.}$$

En la práctica, si tenemos 1,500 ml. de solución de ácido clorhídrico con una concentración de 275.0 grs/litro,

Concentración g/litro

Gráfico Nº 1 - Curva de Disolución del Aluminio metálico en solución de ácido clorhídrico



entonces la cantidad (peso) de HCl disponible será:

$$\text{HCl (disponible)} = 275.0 \text{ grs./litro} \times 1.5 \text{ litros} = 412.5 \text{ grs.}$$

Pero como esta solución ha sido titulada con carbonato de sodio y se ha utilizado el factor que corresponde al ácido sulfúrico, entonces al valor de 412.5 grs., hay que multiplicarlo por la siguiente relación:

$$R = \frac{2 \text{ HCl}}{\text{H}_2\text{SO}_4} = \frac{2 \times 36.5}{98} = 0.75$$

o sea que R viene a ser la relación entre 2 moles de ácido clorhídrico a una mol de ácido sulfúrico, pero el común denominador es que en ambos pesos están involucrados 2 átomos de hidrógeno.

De manera que si multiplicamos el peso de HCl por 0.75, obtendremos el peso real de ácido clorhídrico:

$$412.5 \times 0.75 = 310.0 \text{ gramos}$$

Debemos tener en cuenta que la solución de cloruro de aluminio queda con una acidez remanente (pH = 0.8), que equivale más o menos a unos 2 gramos por litro, con lo que se completa el balance del ácido clorhídrico.

Como puede apreciarse, la reacción es casi estequiométrica, pues reacciona casi un 99 % del ácido clorhídrico con el aluminio.

Teniendo ya resuelto el problema de disolución del aluminio, el siguiente paso fue tratar la solución de cloruro de aluminio para producir sulfato.

El primer intento fue tratarla con vapor de agua, de acuerdo a la siguiente reacción:



Nuestra intención fue producir hidróxido de aluminio para después neutralizarlo con ácido sulfúrico. Para llevar a cabo estas pruebas, se disolvió una regular cantidad de aluminio con ácido clorhídrico, y la solución resultante se repartió en 3 partes:

- a) Una parte se trató con vapor de agua.
- b) la otra parte con agua hirviendo.
- c) la tercera se concentró por evaporación para producir cloruro de aluminio sólido, y posteriormente dividir este sólido en 2 partes para tratarlos con agua hirviendo y vapor de agua respectivamente.

Ninguna de estas pruebas dio resultados satisfactorios.

Las pruebas con vapor de agua eran bastante difíciles e incómodas de ejecutar, y además, el vapor de agua venía bastante impuro.

Nos quedó un excedente de solución de cloruro de aluminio, la cual tratamos directamente con ácido sulfúrico H_2SO_4 , para ver la forma como reaccionaba con la solución de cloruro de aluminio. Esta fue simplemente una prueba cualitativa. Al final, después de concentrar la solución resultante por evaporación, se obtuvo un residuo blanco, al cual

se le analizó por $\text{SO}_4^{=}$, Cl^- y Al. Dio un valor bastante bajo de cloro, dándonos una pauta para seguir con este proceso.

c) Primera Prueba Cuantitativa: Entonces nuestro siguiente paso fue realizar una prueba eminentemente cuantitativa del proceso. Esta experiencia se denominó: "Prueba Cuantitativa de Producción de Sulfato de Aluminio". Las condiciones operatorias fueron las siguientes:

A 800 ml. de agua destilada, se añadieron 700 ml de $\text{HCl} 12\text{N}$, para producir una solución de una concentración de más o menos 280.0 gramos/litro.

Seguidamente, se adicionó aluminio poco a poco y en forma de virutas (de 10 en 10 gramos). Se tituló la solución cada 20 minutos para ver como progresaba la reacción.

Los resultados de las titulaciones fueron las siguientes.

<u>Nº</u>	<u>Temp.ºC</u>	<u>Tiempo (min.)</u>	<u>Soln. Na_2CO_3 (ml.)</u>	<u>Concent. ácida grs/lt.</u>	<u>pH</u>	<u>aluminio añadido (grs.)</u>
1	50	0	26.0	275.0	-	10.0
2	65	20	23.0	243.3	-	10.0
3	70	40	20.5	216.8	-	10.0
4	70	60	13.5	142.8	-	20.0
5	82	80	10.0	105.8	-	10.0
6	70	100	5.8	62.2	-	10.0
7	65	200	-	-	0.80	10.0
8	65	290	-	-	1.00	

<u>Nº</u>	<u>Temp.ºC</u>	<u>Tiempo (min.)</u>	<u>Soln. Na₂CO₃ (ml.)</u>	<u>Concent. ácida grs/lt.</u>	<u>pH</u>	<u>aluminio añadido (grs.)</u>
9	63	310	-	-	1.05	
10	65	330	-	-	1.05	
11	67	350	-	-	1.15	

Durante los primeros momentos de la etapa de disolución, la reacción fue bastante exotérmica, llegándose a alcanzar hasta 82º C. Pero a medida que se fue consumiendo el ácido clorhídrico, fue disminuyendo el calor generado por la reacción, de manera que se necesitó suministrar calor para que la reacción continuara a velocidad apreciable. El pH de la solución filtrada al cabo de 350 minutos de disolución fue de 1.15, lo cual representa una concentración ácida de más o menos 1 gramo/litro. El peso de aluminio disuelto fue de 77.5 gramos. De manera que el balance de ácido clorhídrico durante la etapa de disolución puede plantearse de la siguiente forma:

$$\text{HCl (entrante)} = \text{HCl (consumido)} + \text{HCl (remanente)}$$

El HCl (entrante) es igual a:

$$\begin{aligned} \text{HCl (entrante)} &= 275.0 \text{ grs/litro} \times 1.5 \text{ litros} \times 0.75 \\ &= 313.0 \text{ grs.} \end{aligned}$$

$$\text{HCl (remanente)} = 1.0 \text{ grs/litro} \times 1.1 \text{ litro} = 1.1 \text{ gramos.}$$

Siendo 1.1 litros el volumen de la solución filtrada.

$$\begin{aligned} \text{De manera que el HCl (consumido) será igual a: } & 313.0 - 1.1 \\ &= 311.9 \text{ gramos.} \end{aligned}$$

Si ahora calculamos el HCl (consumido) en base al peso de aluminio disuelto, tendremos lo siguiente:

$$\text{HCl (consumido)} = \frac{77.5 \times 109.5}{27.0} = 312.0 \text{ grsmos.}$$

Como puede verse, los balances coinciden por uno y otro lado, apreciándose que la reacción es completamente estequiométrica.

A continuación, se preparó una solución de ácido sulfúrico de una concentración de 300 grsmos/litro. El volumen de esta solución fue de 1,015 ml., de manera que la cantidad de ácido sulfúrico fue de 304.5 gramos.

Si observamos la siguiente ecuación:



podremos ver que para 77.5 gramos de aluminio disuelto, se necesitarán:

$$\text{H}_2\text{SO}_4 = \frac{77.5}{2 \times 27} \times \frac{3}{1} \times \frac{98}{1} = 422.0 \text{ gramos}$$

Por lo que resultaba insuficiente los 304.5 gramos añadidos inicialmente, de manera que era preciso agregar una mayor cantidad de ácido. Se adicionaron 270.4 gramos más de ácido, consiguiendo un total de 574.9 gramos.

De manera que hubo un exceso de ácido sulfúrico igual a:

$$\% \text{ exceso} = \frac{574.9 - 422.0}{422.0} \times 100 = 31.5 \%$$

La solución de cloruro de aluminio fue agregada a los 574.9 gramos de H_2SO_4 en solución, La solución resultante fue:

concentrada por evaporación. Durante esta etapa, el primer compuesto en volatilizarse fue el agua. A medida que se hacía más pastoso el residuo (de un color amarillento), entonces recién comenzó a volatilizarse el cloro en forma de cloruro de hidrógeno gaseoso. El sólido pastoso inicialmente amarillento comenzó a volverse blanquecino y a tomar una mayor consistencia. Esta etapa fue llevada a cabo a 80 °C. El peso final de supuesto sulfato de aluminio seco fue de 680.0 gramos.

Los análisis fueron los siguientes:

$$\text{Al} = 11.0 \%$$

$$\text{Cl}^- = 0.03 \%$$

$$\text{SO}_4 = 70.0 \%$$

La distribución por peso de los diferentes elementos puede hacerse de la siguiente forma:

$$\text{Al} = 680.0 \times 0.11 = 75.0 \text{ gramos}$$

$$\text{Cl}^- = 680.0 \times 0.0003 = 0.02 \text{ gramos}$$

$$\text{SO}_4 = 680.0 \times 0.70 = 476.0 \text{ gramos}$$

Para conocer la cantidad de SO_4 que está combinado con los 75.0 gramos de aluminio (formando el compuesto neutro $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$), tendremos que realizar el siguiente cálculo: Cada 54 gramos de aluminio se combinan con 288 grs. de SO_4 , por lo tanto la relación de SO_4 a Al será: $\frac{288}{54} = 5.35$.

Por lo tanto, de lo anterior se desprende que la cantidad de SO_4 que se combina con Al será: $75.0 \times 5.35 = 401.25 \text{ grs.}$

El resto del sulfato, o sea $476.00 - 401.25 = 75.75$ gramos permanece como ácido libre.

Si hacemos una nueva distribución ponderal de los diferentes elementos y compuestos del sulfato de aluminio, tendremos lo siguiente:

$$\text{Al} = 75.0 \text{ grs.}$$

$$\text{SO}_4 = 476.0 \text{ grs.}$$

$$\text{Cl} = 0.02 \text{ grs.}$$

$$\text{H}^+ = 75.75 \times 2/98 = 1.58 \text{ grs.}$$

Si sumamos estos pesos, obtendremos un total de: 552.6 grs. Como vemos, falta para 680.0 grs., que es el peso de sulfato de aluminio. La diferencia es el agua de cristalización y que es igual a:

$$680.0 - 552.6 = 127.4 \text{ gramos.}$$

Como una mol de agua pesa 18.0 gramos, entonces en 127.4 grs.

habrá: $\text{No de moles de agua} = \frac{127.4}{18.0} = 7$

Se trata pues de un sulfato hidratado con 7.0 moles de agua de cristalización.

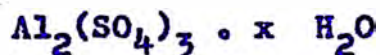
Esta agua de combinación representa más o menos un 18% del peso total de sulfato. Además, contiene un pequeño exceso de ácido libre, que se produce por la excesiva cantidad de ácido sulfúrico utilizado en la etapa de concentración por la solución por evaporación.

d) Segunda serie de Pruebas Cuantitativas: Esta serie de pruebas constó de 5 experiencias y se tuvo como objetivo cono-

cer a fondo la etapa misma de producción de sulfato de aluminio (la etapa de concentración por evaporación). La serie consistió en tratar un mismo peso de aluminio (disuelto previamente con ácido clorhídrico) con diferentes pesos de ácido sulfúrico (en solución). En la primera experiencia de esta serie se empleó una cantidad (gramos) de ácido sulfúrico con un 5% menor que la requerida estequiométricamente. En la segunda, tercera y cuarta experiencias se utilizó un exceso sobre la cantidad estequiométrica, que fueron respectivamente del 10, 20 y 60 %. En la quinta experiencia de esta serie se empleó la proporción estequiométrica.

El aspecto más importante en la realización de estas pruebas fue conocer el contenido de ácido del sulfato de aluminio producido.

Si consideramos que el sulfato de aluminio neutro está compuesto únicamente de Al y SO_4^{\equiv} , entonces de acuerdo a la fórmula química debe contener 16% de Al y 84% de SO_4^{\equiv} ; pero también debemos considerar el hecho de que este compuesto se hidrata fácilmente (adquiere su estructura el agua de cristalización o combinación) para producir un compuesto de la siguiente fórmula general:



La tabla que a continuación se presenta nos permite ver la variación del porcentaje de Al y SO_4 , cuando incrementa el

número de moles de agua de combinación.

x	1	3	5	7	9	11	13	15
Al	15.0	13.6	12.5	11.5	10.7	10.0	9.4	8.8
SO ₄	80.0	72.8	66.7	61.5	57.2	53.3	50.1	47.1
H ₂ O	5.0	13.6	20.8	27.0	32.1	36.7	40.5	44.1

Como vimos anteriormente, la relación de SO₄²⁻ a Al en el sulfato de aluminio neutro y anhidro se puede determinar mediante la siguiente relación: $\frac{84}{16} = 5.25$. Esto quiere decir que si cualquier relación es mayor que la anterior en algún compuesto, entonces se puede suponer que algo del aluminio está como cloruro.

Las concentraciones de ácido clorhídrico utilizados para las 5 pruebas fueron:

191.6; 190.5; 190.5; 188.5; 190.5 gramos/litro.

Los pesos de aluminio disuelto para estas concentraciones fueron respectivamente:

18.0 - 19.0 - 19.0 - 19.3 - 17.3 gramos.

Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

<u>Nº</u>	<u>Código</u>	<u>Concent. ácido grs/lit.</u>	<u>HCl grs.</u>	<u>Peso Al Disuelto</u>	<u>Conc. H₂SO₄ (grs)</u>	<u>Peso Sulfato</u>	<u>Al %</u>	<u>SO₄ %</u>	<u>Cl %</u>
1	180	191.6	72.8	18.0	90.0	91.0	10.0	50.0	2.15
2	220	190.5	72.4	19.0	110.5	155.0	10.2	57.3	0.09
3	240	190.5	72.4	19.0	120.4	168.9	9.0	50.0	0.11
4	320	188.5	71.7	19.3	159.6	228.5	7.5	62.7	0.01
5	Esteq.	190.5	72.4	17.0	103.6	148.0	9.9	56.1	0.07

La principal conclusión que se obtuvo de la realización de estas pruebas fue que el sulfato de aluminio producido en la proporción estequiométrica contenía la menor cantidad de ácido libre, con respecto a los otros sulfatos producidos, excepto en el que se utilizó un defecto de ácido; pero éste tenía el inconveniente de contener un elevado porcentaje de cloro.

Además, el sulfato de aluminio producido en las condiciones estequiométricas tenía en su molécula agua de cristalización o combinación, pero dicho contenido era menor que en los otros casos.

De manera que recién con la realización de estas pruebas se pudo afirmar que era metalúrgicamente posible producir sulfato de aluminio, y que las mejores condiciones eran las que correspondían a la proporción estequiométrica (dependiendo del peso de aluminio disuelto)

Como nuestro objetivo era producir un sulfato de aluminio anhidro, es decir con un 16 % de Al y 84 % de SO_4^{2-} , entonces el siguiente paso era eliminar el agua de cristalización; de manera que se iniciaron pruebas de calcinación del sulfato de aluminio estequiométrico hidratado.

e) Pruebas de Calcinación del Sulfato de Aluminio Estequiométrico Hidratado:

Estas experiencias consistieron básicamente en la calcinación del sulfato de aluminio estequiométrica hidratado a

diferentes temperaturas y tiempos de tratamiento. Se efectuaron. En la primera se varió la temperatura, manteniéndose el tiempo constante en 1.5 horas. En la segunda serie se variaron los tiempos de calcinación, manteniéndose la temperatura constante en 550°C. En la tercera serie de experiencias se variaron nuevamente las temperaturas, manteniéndose el tiempo constante, pero esta vez en 3 horas. En pocas palabras, la descripción de las pruebas es la siguiente: Se trató de preparar siempre una solución de ácido clorhídrico que tuviera una concentración suficiente como para disolver unos 28 gramos de aluminio. El peso de aluminio disuelto es un factor muy importante para poder determinar cual va a ser la concentración de ácido sulfúrico necesario para producir un sulfato de aluminio estequiométrico.

Luego del periodo de neutralización de la solución de ácido sulfúrico, se tuvo la etapa de concentración por evaporación hasta producir un sólido blanco y seco. A continuación se pesó dicho producto y se dividió en 4 partes. Una de ellas se envió a analizar (sulfato sin calcinar) al laboratorio. Las 3 restantes fueron calcinadas, variando tiempo y temperaturas de tratamiento.

Resultados de las Pruebas:

- 1) Primera Serie: (tiempo constante = 1.5 horas; temperaturas = 250, 450 y 550 °C)

Concentraciones:

1. Del ácido clorhídrico = 234.5 grs./litro.

2. Del ácido sulfúrico = 300.0 grs./litro.

Pesos:

1. Aluminio disuelto = 27.5 grs.

1. Sulfato producido = 249.0 grs.

Pesos de los Productos calcinados:

1. Sulfato calcinado a 250°C durante 1.5 horas.

a) antes = 50.0 grs.

b) después = 36.5 grs.

2. Sulfato calcinado a 450°C durante 1.5 horas.

a) antes = 50.0 grs.

b) después = 35.1 grs.

3. Sulfato calcinado a 550°C durante 1.5 horas.

a) antes = 50.0 grs.

b) después = 33.7 grs.

Compuestos	<u>SO₄⁼</u>	<u>Al</u>	<u>Cl⁻</u>
1. Sulfato sin calcinar I	60.1	10.4	0.07
2. Sulfato calcinado a 250°C	70.0	13.1	0.37
3. Sulfato calcinado a 450°C	72.8	13.7	0.02
4. Sulfato calcinado a 550°C	80.3	14.5	0.05

Los balances se hicieron en base a los porcentajes de Al, SO₄⁼ y Cl⁻ reportados por el laboratorio. La suma de estos 3 porcentajes más el agua de cristalización y el ácido libre deben sumar el 100%.

En igual forma como lo efectuamos anteriormente, para calcular el peso de $\text{SO}_4^{\text{=}}$ que se combina con el aluminio, debemos multiplicar el peso de aluminio por 5.25, que es la relación de $\text{SO}_4^{\text{=}}$ a Al, en el sulfato de aluminio neutro y puro.

En el cuadro siguiente ilustramos los resultados en una forma más explícita y completa.

	Sulfato sin Calcinar I		Sulfato Calcinado a 250°C		Sulfato Calcinado a 450°C		Sulfato Calcinado a 550°C	
	Peso(grs.)	%	Peso(grs.)	%	Peso(grs.)	%	Peso(grs.)	%
Al	5.20	10.40	4.78	13.10	4.80	13.70	4.80	14.20
$\text{SO}_4^{\text{=}}$	30.05	60.10	25.55	70.00	25.55	72.80	27.08	80.30
$\text{Cl}^{\text{-}}$	0.03	0.07	0.10	0.37	0.01	0.02	0.02	0.05
$\text{H}^{\text{+}}$ *	0.07	0.13	0.01	0.03	0.01	0.08	0.04	0.20
$\text{H}_2\text{O}^{\text{c}}$	14.65	29.30	6.06	16.50	4.73	13.40	1.78	5.28
Total	50.00	100.00	36.50	100.00	35.10	100.00	33.70	100.00

* Estos valores son simplemente asumidos, en base a los porcentajes de $\text{SO}_4^{\text{=}}$, Al y $\text{Cl}^{\text{-}}$.

2) Segunda Serie: (temperatura constante = 550°C, tiempos de 1.5, 2.0 y 2.5 horas)

Concentraciones:

1. Acido clorhídrico = 235.57 grs./litro.
2. Acido sulfúrico = 327.0 grs./litro.

Pesos:

1. Aluminio disuelto = 30.0 gramos
2. Sulfato producido = 295.0 gramos

Pesos de los Productos Calcinados:

1. Sulfato calcinado a 1.5 horas

a) antes = 70.0 grs.

b) después = 44.8 grs.

2. Sulfato calcinado a 2.0 horas

a) antes = 70.0 grs.

b) después = 44.3 grs.

3. Sulfato calcinado a 2.5 horas

a) antes = 70.0 grs.

b) después = 44.6 grs.

Análisis Químicos

Compuestos	<u>SO₄^s</u>	<u>Al</u>	<u>Cl^{as}</u>
1. Sulfato sin calcinar II	66.0	9.7	0.03
2. Sulfato calcinado a 1.5 horas	75.7	15.0	0.02
3. Sulfato calcinado a 2.0 horas	84.4	15.4	0.14
4. Sulfato calcinado a 2.5 horas	84.6	15.3	0.14

En igual forma que para la primera serie de pruebas, los resultados para esta segunda corrida de experiencias a parecen en el siguiente cuadro:

	Sulfato sin Calcinar II		Sulfato Calcinado a 1.5 hrs.		Sulfato Calcinado a 2.0 hrs.		Sulfato Calcinado a 2.5 hrs.	
	Peso(grs.)	%	Peso(grs.)	%	Peso(grs.)	%	Peso(grs.)	%
Al	6.79	9.70	6.81	15.00	7.82	15.40	6.82	15.30
SO ₄ ²⁻	46.30	66.00	35.60	78.70	37.38	84.40	37.73	84.60
Cl ⁻	0.02	0.03	0.01	0.02	0.05	0.14	0.06	0.14
H ⁺ *	0.32	0.47	0.21	0.48	0.05	0.06	0.06	-
H ₂ O ^o	16.67	23.80	2.17	5.80	-	-	-	-
Total	50.00	100.00	44.80	100.00	44.30	100.00	44.67	100.00

* Estos valores son simplemente asumidos en base a los porcentajes de SO₄²⁻, Al y Cl⁻.

3) Tercera Serie: (temperaturas = 250, 450 y 550°C; tiempo constante de 3 horas.)

Concentraciones:

1. Acido clorhídrico = 230.3 gramos/litro.

2. Acido sulfúrico = 298.3 gramos/litro.

Pesos:

1. Aluminio disuelto = 26.5 gramos

2. Sulfato producido = 271.0 gramos

Pesos de los Productos calcinados:

1. Sulfato calcinado a 250°C durante 3 horas.

a) antes = 60.0 grs.

b) después = 44.2 grs.

2. Sulfato Calcinado a 450°C durante 3 horas.

a) antes = 60.0 grs.

después = 40.5 grs.

3. Sulfato calcinado a 550°C durante 3 horas.

a) antes = 60.0 grs.

b) después = 40.5 grs.

Análisis Químicos

Compuestos	SO_4^{2-}	Al	Cl^-
1. Sulfato sin calcinar III	63.4	10.1	0.05
2. Sulfato calcinado a 250°C	75.7	13.2	0.05
3. Sulfato calcinado a 450°C	83.1	15.2	0.05
4. Sulfato calcinado a 550°C	84.2	16.0	0.05

Los resultados completos de esta tercera serie de pruebas aparecen en el siguiente cuadro:

	Sulfato sin Calcinar III		Sulfato Calcinado Calcinado		Sulfato Calcinado a 450 °C		Sulfato Calcinado a 550 °C	
	Peso(grs.)	%	Peso(grs.)	%	Peso(grs.)	%	Peso(grs.)	%
Al	6.06	10.10	5.83	12.30	6.16	15.20	6.48	16.00
SO_4^{2-}	38.04	63.40	33.46	75.70	33.65	83.10	34.10	84.20
Cl^-	0.03	0.05	0.02	0.05	0.02	0.05	0.02	0.05
H^+ *	0.13	0.20	0.06	0.15	0.03	0.05	-	-
H_2O *	15.74	26.25	4.83	10.90	0.64	1.60	-	-
Total	60.00	100.00	44.20	100.00	40.50	100.00	40.50	100.25

* Estos valores son simplemente asumidos en base a los porcentajes de SO_4^{2-} , Al y Cl^- .

4) Conclusiones de las Pruebas de Calcinação:

Se ha conseguido eliminar toda el agua de cristaliza -

ción del sulfato de aluminio hidratado calcinándolo a 550°C durante 3 horas.

Sin embargo, se puede conseguir el mismo objetivo si se eleva la temperatura y se disminuye el tiempo, o en su defecto, se baja la temperatura y se alarga el tiempo de tratamiento.

Estos puntos pueden ser apreciados objetivamente en los gráficos que se insertan con el informe.

En el primer gráfico (Nº 2), se plotean los porcentajes de SO_4^{2-} y Al en función de los diferentes tiempos de tratamiento, manteniéndose a la temperatura como parámetro.

En tanto que en el gráfico Nº 3, también se plotean los porcentajes de SO_4^{2-} y Al, pero esta vez en función de las temperaturas, manteniéndose el tiempo como un parámetro.

Como se dijo anteriormente, se pretende conseguir un producto que tenga 84% de SO_4^{2-} y 16 % de Al, de manera que el tiempo correspondiente a cada temperatura para producir el compuesto deseado se calcula (o extrapola) determinando el punto de unión de la curva con la paralela correspondiente a 84 % en el caso del sulfato y 16 % en el caso del aluminio. Técnicamente, ambos puntos deben caer sobre la misma vertical. Esto sucede para el sulfato calcinado a 550°C durante 3 horas. El otro gráfico sirve como una comprobación del primero ó viceversa.

Gráfico N°2 : Calentamiento

Parámetro : Temperatura

Variable : Tiempo

80

72

64

550°C

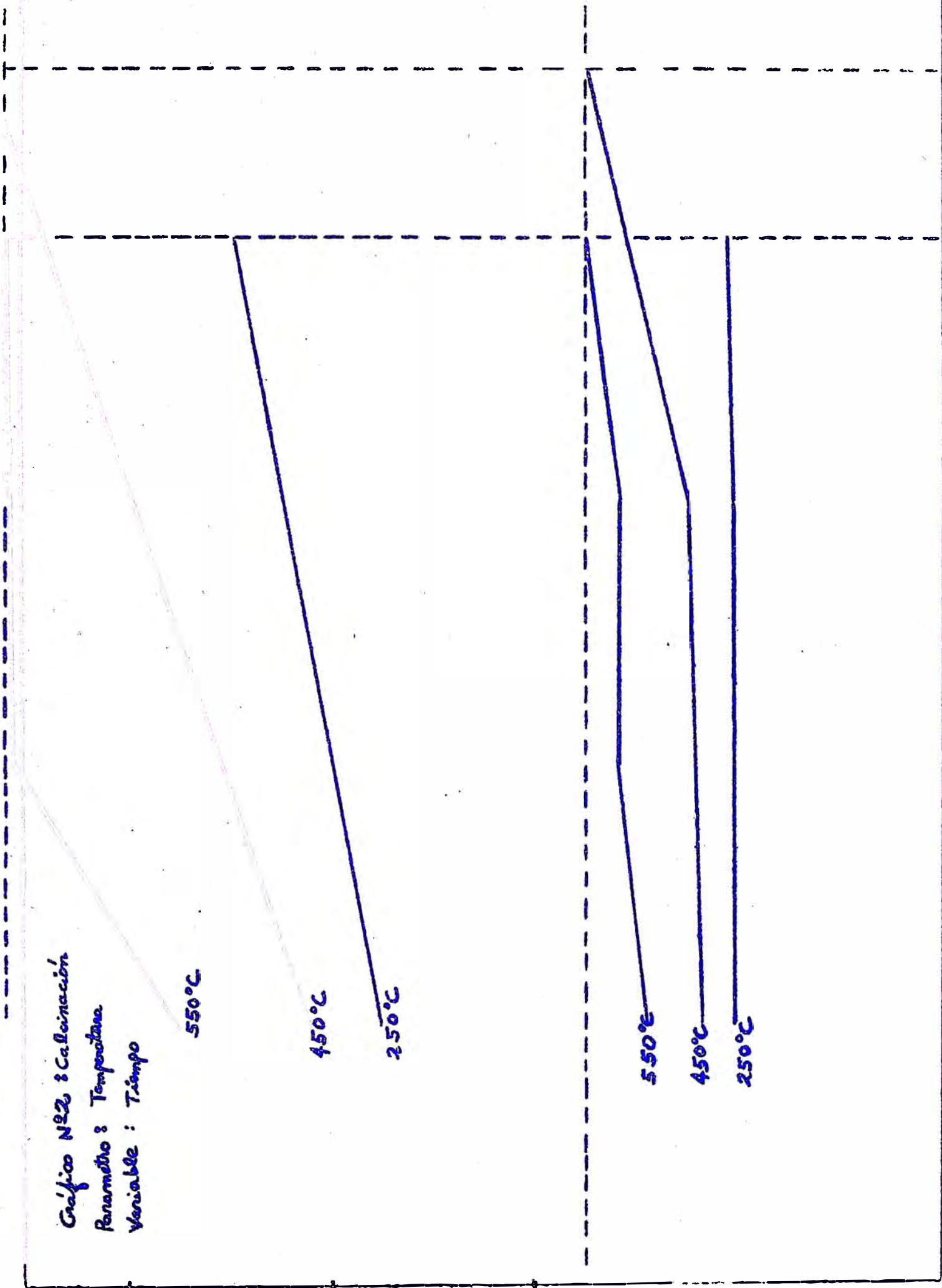
450°C

250°C

550°C

450°C

250°C

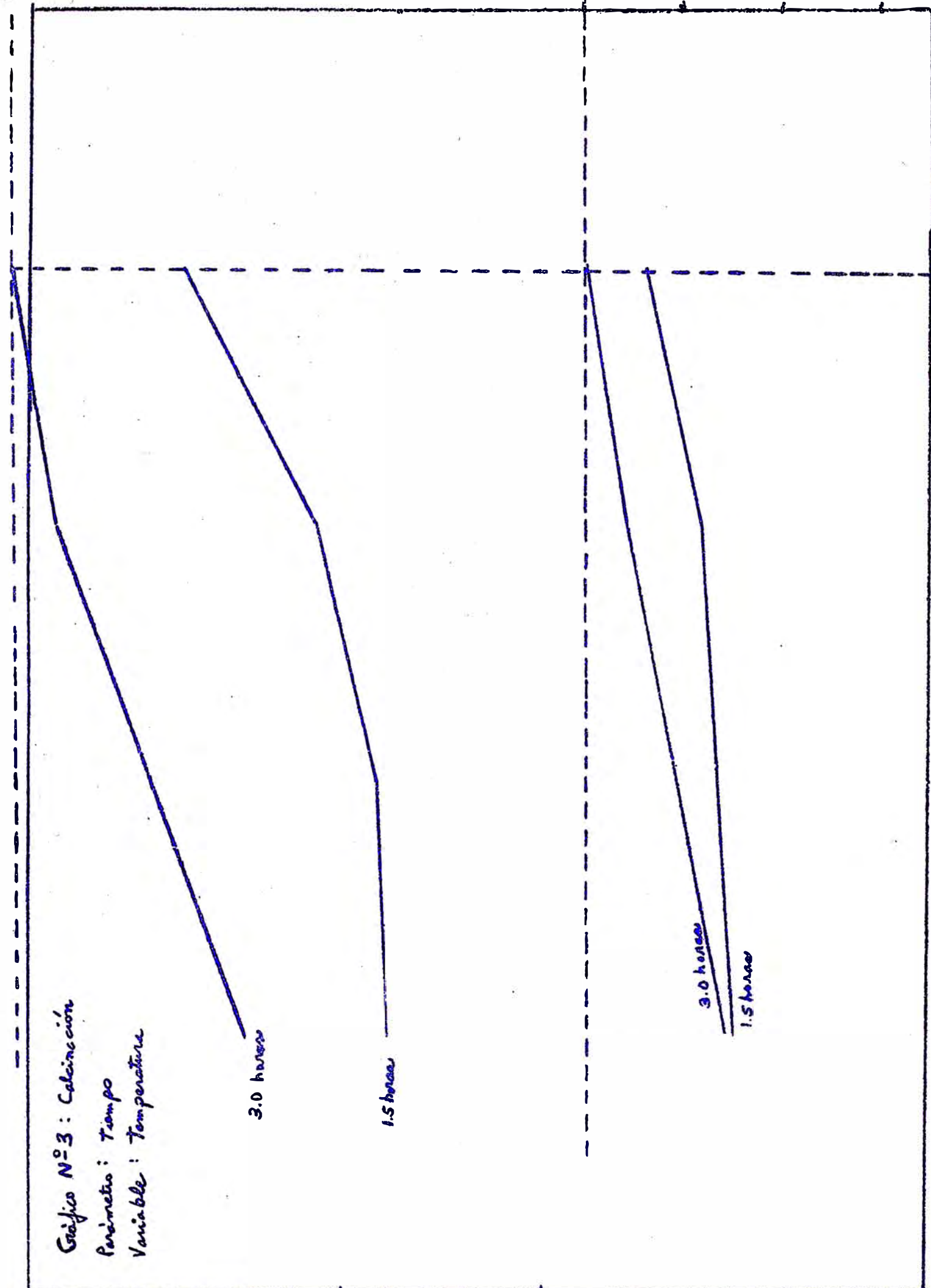


50%

Gráfico N° 3 : Calcificación

Parámetro : Tiempo

Variable : Temperatura



30

42

64

3.0 horas

1.5 horas

3.0 horas

1.5 horas

f) Resultados Generales de las Pruebas de Laboratorio

1) Etapa de Disolución:

La disolución del aluminio en la solución de ácido clorhídrico es bastante rápida y casi completa.

El tiempo de disolución promedio en todas las pruebas ha sido de 5 horas, y finaliza cuando el pH de la solución es 1.0 - 1.2.

La solución final de cloruro de aluminio tiene una acidez remanente de más o menos 1 - 2 gramos/litro de ácido clorhídrico.

Durante la disolución, después que se ha consumido ácido clorhídrico por debajo de cierto nivel, el sistema necesita de una fuente externa de calor para que la reacción continúe a una velocidad apreciable.

Al final de esta etapa es necesario conocer la cantidad de aluminio disuelto, ya que este dato es importante para el cálculo del ácido sulfúrico que se necesita en la siguiente etapa.

Asimismo, al término de la etapa de disolución es necesario purificar (eliminar el aluminio no disuelto) la solución de cloruro de aluminio para la etapa siguiente.

La temperatura de salida de la solución es de más o menos unos 40°C. La solución final de cloruro de aluminio tiene un volumen que representa más o menos un 72% del volumen inicial cargado.

2) Etapa de Filtrado:

Se requiere simplemente una separación primaria entre una solución bastante fluida y partículas pequeñas de aluminio no disuelto.

3) Etapa de Concentración por Evaporación

La velocidad o rapidez con que se lleva a cabo esta etapa (evaporación del H_2O y del HCl) depende primordialmente de la temperatura, así que cuanto mayor sea ésta, más rápido se producirá la expulsión de los compuestos volátiles.

En las pruebas realizadas, se ha trabajado a una temperatura de más o menos $90^{\circ}C$, y el tiempo promedio de la reacción fue de 4.0 horas.

Durante esta etapa se debe realizar la recuperación del HCl gaseoso que se escapa después que lo ha hecho el vapor, ya que el HCl se puede volver a utilizar en la etapa de disolución.

La concentración por evaporación es a sequedad, quedando al final un residuo blanco de sulfato de aluminio hidratado.

El problema que se presenta es la extracción del sulfato sólido del evaporador. Esto se puede solucionar con un diseño adecuado de equipo.

4) Etapa de Calcinación:

Las condiciones de esta etapa para producir un sulfato

de aluminio anhídrido (84% de SO_4 y 16% de Al) son las siguientes:

A. Tiempo = 3 horas

B. Temperatura = 550 °C

Como hemos visto anteriormente, se pueden escoger otros pares de valores tiempo-temperatura de calcinación, para ver después de un estudio económico cual es el más apropiado.

Las calcinaciones durante las pruebas de laboratorio fueron realizadas en el Horno eléctrico Hoskins.

Otro aspecto importante durante esta etapa es que el material esté removiéndose todo el tiempo para que se calcine uniformemente.

g) Conclusiones Generales de las Pruebas de Laboratorio

1) Etapa de Disolución:

Como se trata de un proceso que requiere bastante cuidado con los materiales entrantes y salientes, es necesario que se realice en forma discontinua (proceso batch).

Además, es necesario conocer exactamente el peso de aluminio disuelto, por lo que se requiere pesar tanto el aluminio inicialmente alimentado como el remanente no disuelto. Esta diferencia de peso es muy importante para calcular la cantidad de ácido sulfúrico requerido en la etapa siguiente.

Por otro lado, la solución de cloruro de aluminio por filtrar es baja en contenido de ácido, por lo que no debe ofrecer ningún problema de deterioro de filtro.

2) Etapa de Filtrado:

Como se requiere solamente una separación primaria, el filtro no necesariamente debe ser de buena calidad. Podría pensarse en una tela ordinaria o sino en una malla metálica. Además, no sería necesario utilizar vacío, ya que la filtración es bastante rápida.

3) Etapa de Concentración por Evaporación:

En vista de las condiciones que necesita esta etapa, se requiere de un recipiente completamente cerrado, con excepción de un pequeño conducto por donde deben salir los compuestos evaporados. Además, dicho recipiente debe tener un sistema de calentamiento, que permita alcanzar una temperatura mínima de 80°C. Este sistema podría ser uno de vapor.

El recipiente debe tener una base de gran superficie, para facilitar la evaporación de los compuestos volátiles.

En lo que respecta a la recuperación del HCl, se deben emplear primero un sistema de condensación y luego un sistema de absorción de gas por un líquido.

4) Etapa de Calcinación:

Esta etapa puede realizarse bien sea en forma continua o discontinua. La única restricción es que se produzca

una remoción del material durante el proceso y que permanezca dentro del horno 3 horas a 550°C.

No se producirán problemas de contaminación ambiental, ya que lo que se libera es simplemente agua.

Un tipo de horno bastante apropiado para llevar a cabo esta operación puede ser uno eléctrico.

III) Ingeniería General

A) Cálculo del Flow-Sheet

1) Datos de Laboratorio:

- Concentración de solución de HCl 6N = 219.0 gramos / litro.
Si se titula la solución con carbonato de sodio (Na_2CO_3),
entonces debe dar: $219.0 \text{ gr./lit.} \times 0.75 = 164.2 \text{ grs./litro.}$
 - Temperatura de cátodo de solución HCl = 20°C (temp.ambiente)
 - Temperatura de salida de solución de cloruro de
aluminio = 60 °C
 - Tiempo de disolución = 5 horas.
 - Acidez final de la solución : pH = 1.0 - 1.2
 - Tiempo de neutralización = 4 horas
 - Tiempo de calcinación = 3 horas
 - Temperatura de calcinación = 550°C
 - Análisis químico del aluminio = 100 % Al
 - Análisis químico del sulfato anhidro:
 - SO_4^{2-} = 84 %
 - Al = 16 %
 - Cl^- = 0.05 %
 - Relación de aluminio disuelto a sulfato hidratado
producido = 10/1.
 - Relación de aluminio disuelto a sulfato anhidro
producido = 6.34/1.
- Temperatura de salida del H_2O vapor y del cloruro de hidrógeno del evaporador = 50°C.

Temperatura de salida del sulfato anhidro producido = 60°C

Temperatura de entrada de la solución de cloruro de

aluminio = 30°C

Tiempo de condensación = 5 horas

Coefficiente aparente de transferencia de calor en el calcinador

= 15.0 B.T.U./hora x pie²

Calor específico del sulfato de aluminio = 0.3 Kcal/Kg x °C.

Calor latente de vaporización a 180°C = 470 Kcal/kg.

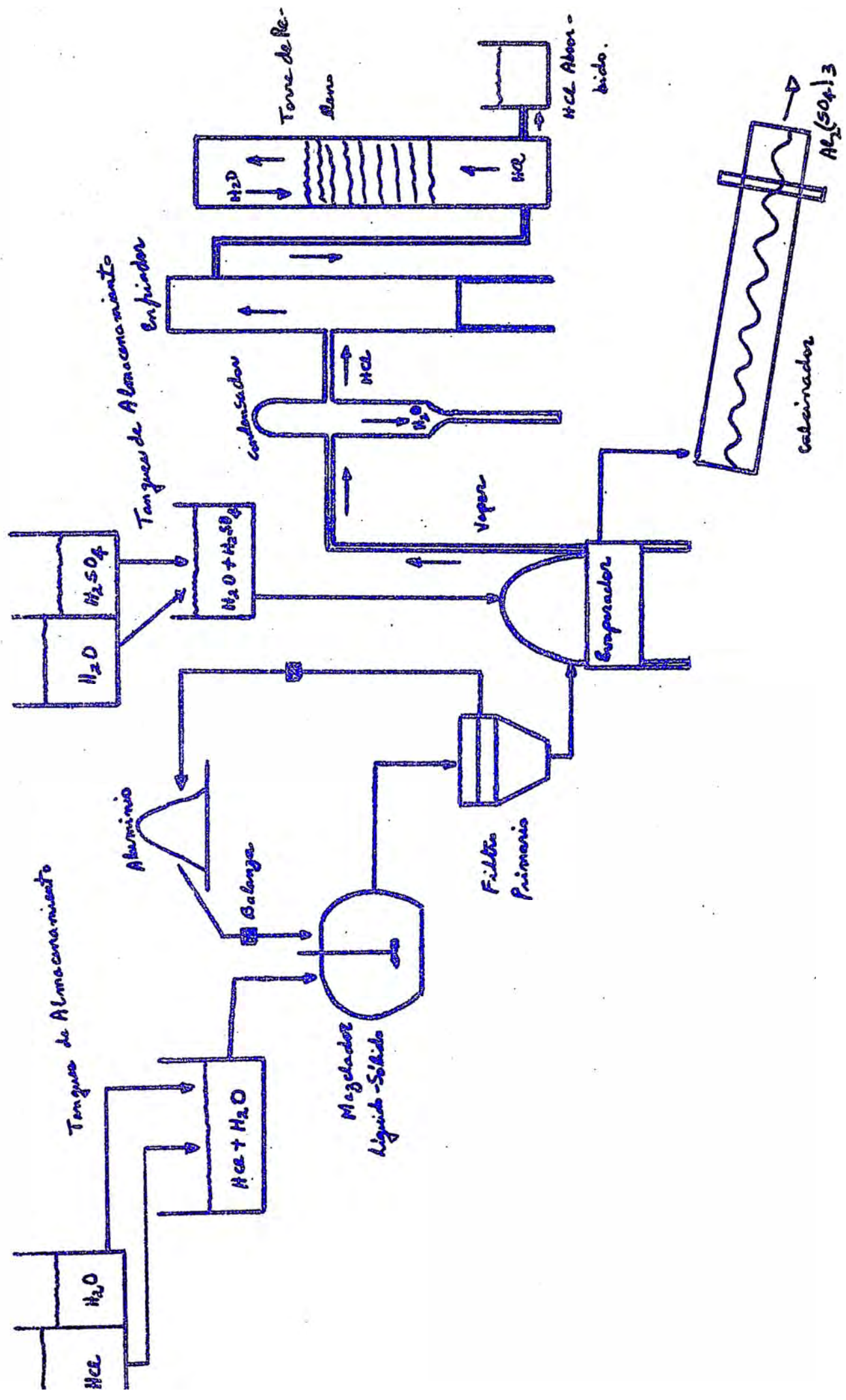
Calor específico promedio del vapor de agua de 180 - 550°C =

0.5 Kcal/Kg x °C.

Tiempo de absorción del cloruro de hidrógeno = 3 horas.

Densidad promedio del gas = 1.629 kgs/m³.

2) Diagrama de Flujo del Equipo Propuesto.



3) Cálculos a partir de las reacciones involucradas

A. Etapa de Disolución:

La reacción que controla esta etapa es la siguiente:



El aluminio utilizado tiene un 100 % de Al, de manera que los 455.0 kgs. reaccionarán con el siguiente peso de HCl:

$$\text{HCl} = \frac{455.0 + 109.5}{27} = 1,245.0 \text{ kgs.}$$

Para calcular el volumen requerido de ácido clorhídrico concentrado que contenga los 1,845.0 kgs., debemos considerar que el ácido clorhídrico concentrado tiene una normalidad de 12 (0.438 kgs/litro). El volumen requerido será:

$$V = \frac{1,945 \text{ kgs.}}{0.438 \text{ kg/lt.}} = 4,212 \text{ litros.}$$

Como se va a trabajar con una concentración de ácido de 6N, entonces el volumen de agua destilada requerido será de 4,212 litros. Por consiguiente, el peso de ese volumen de agua será 4,212 kgs, ya que la densidad del agua es 1.0 kg/litro.

Cálculo del peso de hidrógeno liberado:

$$\text{H}_2 = \frac{455.0 \times 1.5 \times 2.016}{27} = 51.0 \text{ kgs.}$$

Si sabemos que una mol-gramo, en condiciones normales de presión y temperatura, ocupa 22.4 litros, y que el peso de una mol-gramo de hidrógeno es 2.016 gramos, entonces el

volumen liberado será de:

$$V = \frac{51,000 \text{ gramos} \times 22.4 \text{ lt/mol.}}{2.016 \text{ gramos/mol.}} = 567,000 \text{ lt} = 567 \text{ m}^3.$$

Como la solución final de cloruro de aluminio queda con una acidez baja, equivalente a un pH = 1.0 - 1.2, y teniendo en cuenta además que este pH equivale a una concentración de más o menos 1.0 gramos/litro, y que el volumen final de la solución de cloruro de aluminio es un 72% de inicial, entonces el ácido remanente será de:

$$8,424 \times 0.72 \times 1 \times 10^{-3} = 6.0 \text{ kgs.}$$

El hidrógeno en este ácido será

$$6.0 \text{ kgs.} \times 1/36.5 = 0.17 \text{ kgs.}$$

$$H_2 \text{ volatilizado (liberado)} = 51.00 - 0.17 = 50.83 \text{ kgs.}$$

Se puede considerar que esta acidez remanente se debe al aluminio no disuelto y que más o menos representa un 5% del total alimentado (20.0 kgs.)

Cálculo del volumen evaporado de agua:

$$8,424 - 8,424 \times 0.72 = 2,424.0 \text{ litros} (= 2,424.0 \text{ kgs.})$$

esta cantidad representa la pérdida de vapor más hidrógeno.

De manera que el agua evaporada será:

$$2,424.0 - 50.80 = 2,373.2 \text{ kgs.}$$

B. Etapa de Neutralización:

En esta etapa se tiene la siguiente reacción:



Para los 435.0 kgs. de aluminio se necesitarán:

$$\text{H}_2\text{SO}_4 = \frac{435.0 \times 3.98}{2 \times 27} = 2,370.0 \text{ kgs.}$$

Como una solución concentrada de H_2SO_4 es 36N, entonces su concentración será de 1.764 kgs/litro.

El volumen de una solución concentrada será de:

$$V = \frac{2,370.0 \text{ kgs.}}{1.764 \text{ kgs/lt}} = 1,342.0 \text{ litros}$$

Como se va a trabajar con una solución 9N (medianamente concentrada), entonces el volumen de agua será:

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = 1,342.0 \times 4 = 5,368.0 \text{ litros}$$

Correspondientemente, el peso será de 5,368.0 kgs.

Cálculo del vapor liberado en el evaporador:

$$(7,738 + 4,088) - 4,350 = 7,476.0 \text{ kgs.}$$

Como este vapor tiene cloruro de hidrógeno y agua, por medio de un balance de cloro llegamos a determinar cuanto de cloruro de hidrógeno se produce:

$$\text{Cl (entrada)} = \text{Cl(vapor)} + \text{Cl (sulfato)}$$

$$\text{Cl (entrada)} = 1,845.0 \text{ kgs.} \times 35.5/36.5 =$$

$$\text{Cl (sulfato)} = 2,755.0 \text{ kgs.} \times 0.005 =$$

$$\text{Cl (vapor)} = 1,845.0 \times 35.5/36.5 - 14 =$$

$$\text{HCl (vapor)} = (1,845 \times 35.5/36.5 - 14) 36.5/35.5 =$$

$$1,820.0 \text{ kgs.}$$

Como la relación de aluminio disuelto a sulfato hidratado producido es de 10/1, entonces el peso de sulfato hidratado producido será:

Sulfato hidratado = $435.0 \times 10.0 = 4,350.0$ kgs.

El peso de sulfato anhidro, calculado de acuerdo a la ecuación anterior será:

$$\text{Sulfato anhidro} = \frac{435 \times 342}{54} = 2,755.0 \text{ kgs.}$$

C. Etapa de Calcinaación

En esta etapa se lleva a cabo la siguiente reacción:



Como el peso del sulfato hidratado es 4,350.0 kgs. y el peso del sulfato anhidro es 2,755 kgs, entonces el agua de cristalización o combinación liberada será de:

$$\text{H}_2\text{O crist.} = 4,350.0 - 2,755.0 = 1,595.0 \text{ kgs.}$$

4) Balance de Materiales:

a) Reservorio de HCl en solución:

Materiales Entrantes	Materiales Salientes
1) Ac. clor. 12N = 1,845.0 kgs.	1) Soln. de HCl = <u>6,057.0 kg</u>
2) Agua Destil. = <u>4,212.0</u>	Total = 6,057.0
Total = 6,057.0	

b) Mezclador líquido - sólido:

Materiales Entrantes	Materiales Salientes
1) Soln. de HCl = 6,057.0	1) Soln. de cloruro de aluminio con sólidos en susp. = 4,088.0 kg
2) Chatarra de aluminio = <u>455.0</u>	2) Hidrógeno liberado = 50.8
Total = 6,512.0	3) Agua Evapor. = <u>2,373.2</u>
	Total = 6,512.0

c) Filtro:

Materiales Entrantes

- 1) Soln. de cloruro de aluminio con sólidos en susp. = 4,088.0
Total = 4,088.0

Materiales Salientes

- 1) Soln. clara de cloruro de aluminio = 4,068.
2) Aluminio no disuelto = 20.

Total = 4,088.

d) Reservorio de H_2SO_4 en solución:

Materiales Entrantes

- 1) Ac. sulfúrico concentrado = 2,370.0
2) Agua destil. = 5,368.0
Total = 7,738.0

Materiales Salientes

- 1) Solución de H_2SO_4 = 7,738.0

Total = 7,738.0

e) Evaporador

Materiales Entrantes

- 1) Solución de H_2SO_4 = 7,738.0
2) Soln. de cloruro de aluminio = 4,068.0
Total = 11,806.0

Materiales Salientes

- 1) Vapor* = 7,456.
2) Sulfato hidratado = 4,350.
Total = 11,806.0

* Vapor = cloruro de hidrógeno (HCl) + vapor de agua
1,820.0 kgs. + 5,636.0 kgs.

f) Condensador:

Materiales Entrantes

- 1) Vapor (HCl + H_2O) = 7,456.0
Total = 7,456.0

Materiales Salientes

- 1) Vapor de agua condensada = 5,636.
2) cloruro de hidrógeno gaseoso = 1,820.

Total = 7,456.0

g) Absorbedor del cloruro de hidrógeno gaseoso:

Materiales Entrantes	Materiales Salientes
1) Cloruro de hidrógeno gaseoso = 1,820.0 kgs	1) Soln. concentrada HCl = <u>4,820.0</u>
2) Agua destil. = <u>3,000.0</u>	Total = 4,820.0
Total = 4,820.0 kgs	

h) Horno de Calcinación:

Materiales Entrantes	Materiales Salientes
1) Sulfato hidratado = <u>4,350.0</u>	1) Sulfato anhidro = 2,755.0
Total = 4,350.0	2) Vapor de agua = <u>1,595.0</u>
	Total = 4,350.0

5) Flujo de Materiales:

	Peso(kgs.)	Volumen(litros)
a) Reservorio de HCl en soln.		
1) Acido clorhídrico 12N	1,845.0	8,424.0
2) Agua destilada	4,212.0	4,212.0
b) Mezclador líquido-sólido		
1) Soln. de cloruro de aluminio	4,088.0	4,088.0
2) Agua evaporada	2,373.2	2,373.2
3) Hidrógeno liberado	50.8	567 (m ³)
c) Filtro		
1) Soln. clara de cloruro de aluminio	4,068.0	4,068.0
2) Aluminio no disuelto	20.0	-

d) Reservoirio de ácido sulfúrico en solución:

	Peso(kgs.)	Volumen(litros)
1) Acido sulfúrico concentrado 36N	2,370.0	2,684.0
2) Agua destilada	5,368.0	5,368.0

e) Evaporador:

1) Vapor (agua + HCl gaseoso)	7,456.0	7,456.0
2) Sulfato hidratado	4,350.0	-

f) Condensador:

1) Vapor de agua condensada	5,636.0	5,636.0
2) Cloruro de hidrógeno gaseoso	1,820.0	743 (m ³)

g) Absorbedor del Cloruro de hidrógeno (HCl)

1) Cloruro de hidrógeno gaseoso	1,820.0	743 (m ³)
2) Solución concentrada de HCl	4,820.0	11,005

h) Horno de Calcinación

1) Sulfato anhidro	2,755.0	-
2) Vapor de agua (agua de combinación)	1,595.0	1,595.0

B) Diseño y Especificación del Equipo

1) Reservoirios:

Para el proceso se necesitarán los siguientes reservoirios:

- Acido clorhídrico concentrado 12N, para 2 días de trabajo.
- Acido sulfúrico concentrado 36N, para 2 días de trabajo.
- Solución de ácido clorhídrico 6N, para 1 día de trabajo.
- Solución de ácido sulfúrico 9N, para 1 día de trabajo.

e) Agua destilada total, para 2 días de trabajo.

Todos los recipientes tendrán la misma forma circular ($d = h$) y se dará en todos los casos un 10 % de volumen extra como factor de seguridad.

a) Acido clorhídrico concentrado 12N:

Volumen para 2 días = $4,212.0 \times 2 = 8,424.0$ litros

como 1 litro es igual a 1 dm^3 , entonces los volúmenes en litros serán equivalentes:

$$V_T = 8,424.0 + 842.4 = 9,266.4 \text{ dm}^3$$

$$9,266.4 \text{ dm}^3 = \frac{\pi D^3}{4}$$

de donde: $D = 23.0 \text{ dm}$.

b) Acido sulfúrico concentrado 36N:

Volumen para 2 días = $1,342.0 \times 2 = 2,684.0$ litros

$$V_T = 2,684.0 + 268.4 = 2,952.4 \text{ dm}^3$$

De manera que:

$$2,952.4 \text{ dm}^3 = \frac{\pi D^3}{4}$$

de donde: $D = 13.2 \text{ dm}$.

c) Solución de ácido clorhídrico 6N:

Volumen para 1 día de trabajo = $6,057.0$ litros

$$V_T = 6,057.0 + 605.7 = 6,662.7 \text{ dm}^3$$

$$6,662.7 \text{ dm}^3 = \frac{\pi D^3}{4}$$

de donde: $D = 20.5 \text{ dm}$.

d) Solución de ácido sulfúrico 9N:

Volumen por 1 día de trabajo = 7,738.0 litros

$$V_T = 7,738.0 + 773.8 = 8,511.8 \text{ dm}^3$$

$$8,511.8 \text{ dm}^3 = \frac{\pi D^3}{4}$$

De manera que el valor de D será:

$$D = 22.4 \text{ dm.}$$

e) Agua destilada total:

Volumen para 2 días de trabajo = 2(4,212.0 + 5,368.0)

= 19,160.0 litros

$$V_T = 19,160.0 + 1,916.0 = 21,076.0 \text{ dm}^3$$

$$21,076.0 \text{ dm}^3 = \frac{\pi D^3}{4}$$

De donde: D = 30.0 dm.

Los reservorios que almacenan ácidos concentrados deberán estar contruidos de materiales anticorrosivos, o pueden ser revestidos con material anticorrosivo.

2) Mezclador líquido-sólido

El fin que se persigue en este reactor es lograr una mezcla lo más homogénea y uniforme posible entre el material sólido (aluminio) y la solución de ácido clorhídrico. La forma más adecuada del reactor para alcanzar este fin es la esférica, ya que se produce un mínimo asentamiento del material sólido.

El volumen de solución será: 4,212.0 lts. + 4,212 lts =

8,424.0 lts.

agua + ácido clorhídrico 12N

También debemos tomar en consideración el volumen que debe desplazar el aluminio añadido. Como son 455.0 kgs, y la gravedad específica del aluminio es 2.7 kgs/dm³, entonces el volumen desplazado será:

$$V_D = \frac{455.0 \text{ kgs}}{2.7 \text{ kgs/dm}^3} = 168.5 \text{ dm}^3$$

De manera que el volumen total será de:

$$V_T = 8,424.0 + 168.5 = 8,592.5 \text{ dm}^3$$

Se van a considerar 2 reactores, de manera que el volumen de cada reactor será de $8,592.5 \text{ dm}^3 / 2 = 4,296.2 \text{ dm}^3$.

En este caso se va a considerar un 20% de factor de seguridad, de manera que el volumen de diseño será:

$$4,296.2 + 859.2 = 5,155.4 \text{ dm}^3$$

Como la forma del recipiente es esférica, entonces el diámetro será igual a:

$$D = \sqrt[3]{\frac{5,155.4 \times 6}{\pi}}$$

de donde: $D = 23 \text{ dm}$.

Este equipo debe contar además con un sistema de agitación, que mantenga la mezcla en un constante movimiento. El agitador deberá rotar a unos 200 - 300 revoluciones por minuto.

En conclusión, se necesitan 2 reactores de forma esférica, con base plana de 23 dm. de diámetro, y con un sistema de agitación que rote a unos 300 r.p.m. La parte superior debe abrirse o correrse de manera que el carguío se realice fácilmente. Además, deberá contar con un sistema de calentamiento

(sistema de vapor) que eleve la temperatura de la mezcla hasta unos 60°C.

3) Filtros

Lo que se persigue con esta operación de filtrado es simplemente la separación de las partículas de aluminio no disueltas del resto de la solución de cloruro de aluminio. Es importante conocer la cantidad de aluminio no disuelto, ya que esto permitirá calcular la composición de la solución de ácido sulfúrico para la siguiente etapa. De manera que no se necesita de un filtro-prensa, ya que su costo sería demasiado elevado para el fin que se persigue. Por tal razón, se va a determinar las dimensiones de un filtro similar a una especie de embudo que permita dicha separación primaria.

El filtro constaría de 2 partes: una cilíndrica y la otra cónica (cono truncado).

Se necesitarían 2 filtros, una para cada mezclador líquido-sólido.

Las dimensiones serían las siguientes:

- a) Parte cilíndrica: 1.80 mt. de diámetro por 0.80 mt. de altura.
- b) Parte cónica: El diámetro superior sería también de 1.80 mt. La altura sería de 1.50 a 2.00 mts. El diámetro inferior del cono sería de 0.40 mt.

El material que separe los sólidos en suspensión del líquido podría ser una malla metálica de abertura bastante fina (malla 10) que sería soportada por una base de una plancha de acero

con huecos más grandes. Dicha plancha con la malla metálica estarían colocadas muy cerca de la intersección del cilindro con el cono. La malla metálica tendría que ser fácilmente extraíble para pesar el aluminio retenido en ella.

Este es un diseño bastante primario, pero es menester hacerlo de esta manera, ya que no se necesita otra cosa más elaborada.

4) Evaporador

Para el diseño de un equipo de esta naturaleza, es necesario tener en mente los siguientes aspectos:

1. Balance de materiales del proceso
2. Balance energético del proceso
3. Ecuación de capacidad.

A continuación, pasaremos a desarrollar cada uno de los puntos anteriores.

1. Balance de Materiales:

Material Entrante:

a) Solución de H₂SO₄ = 7,738.0 kgs.

b) Soln. de cloruro de aluminio = 4,068.0

Total = 11,806.0 kgs. = 25,974.0 lbs.

Material Saliente:

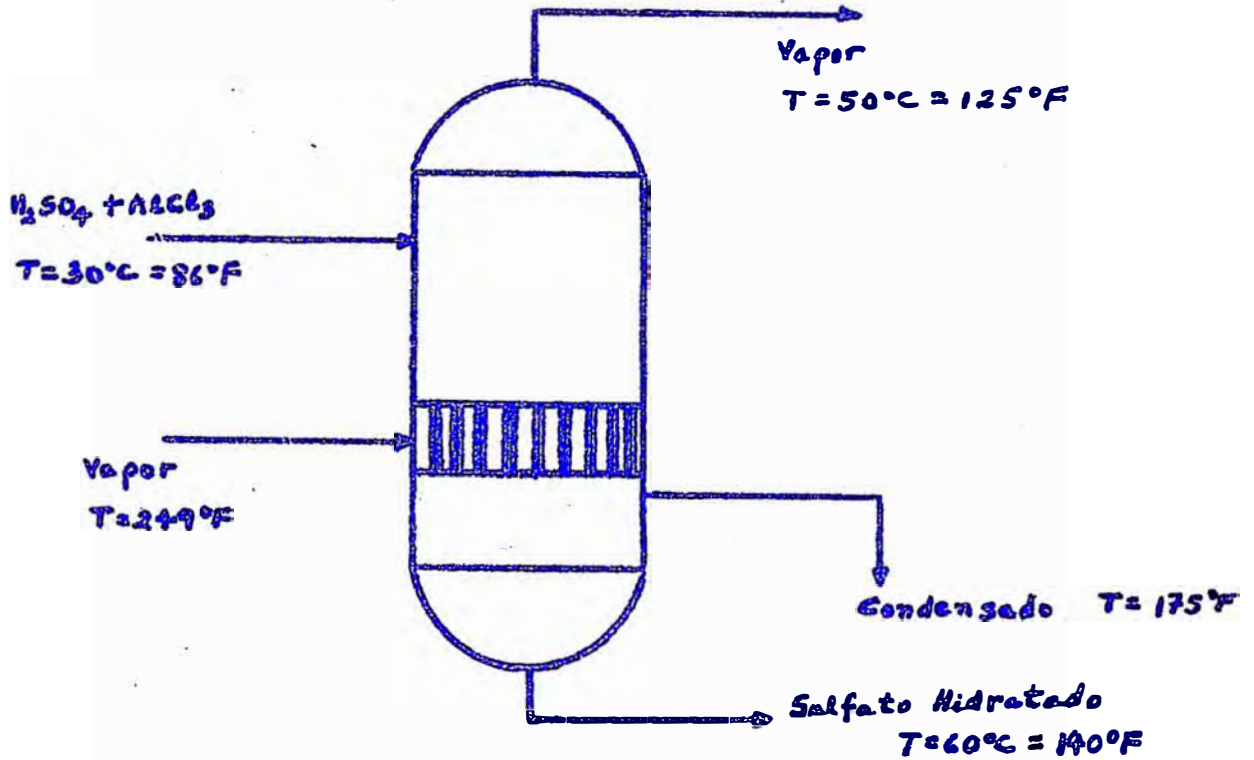
a) Vapor (agua + HCl) = 7,456.0 kgs. (=16,403.0 lbs)

b) Sulfato hidratado = 4,350.0 kgs. (= 9,571.0 lbs)

Total = 11,806.0 kgs.

2. Balance Energético:

Para una mejor visualización del balance energético se acompaña el siguiente gráfico o bosquejo:



El vapor está disponible a 15 lbs/pulg², a 249°F y a un vacío de 26 pulgadas de mercurio, referidas a un barómetro de 30 pulgadas, a ser mantenido en el espacio de vapor.

Calor Entrante:

- Que entra con el vapor
- Que entra con la solución

Calor Saliente:

- Que sale en el vapor evaporado
- Que sale en el vapor condensado
- Almacenado en el sólido hidratado.

Si llamamos W a la cantidad de libras de vapor que se necesitan para suministrar el calor necesario para el proceso, y consideramos que la solución de H_2SO_4 y $AlCl_3$ no contribuye con nada de calor al proceso, pues su nivel calorífico se considera como cero, entonces podremos escribir la siguiente ecuación:

$$W [946 + (249-86)] + 0 = 16,403 \times 1,022 + 9,571 \times 0,542 \times 30 + W (175 - 86).$$

El valor 1,022 representa la cantidad de B.T.U./libra que posee el vapor de agua a 125 °F.

0.542 es el calor específico del sulfato hidratado producido en B.T.U./lb.°C y 30 es la diferencia de temperaturas en grados centígrados.

Si resolvemos la ecuación anterior, llegaremos a la conclusión que: $W = 16,600$ lbs. de vapor.

Como el tiempo del proceso de evaporación debe ser de 4 hrs., entonces el vapor requerido por hora será de:

$$W = 16,600 \text{ lbs de vapor} / 4 \text{ horas} = 4,150 \text{ lbs. de vapor por hora.}$$

Para determinar el diseño de los tubos de vapor del evaporador, se recurre a la siguiente ecuación de capacidad:

$$q = \frac{Q}{\theta} = U \cdot A \cdot \Delta t$$

donde:

q = cantidad de calor por hora que necesita su suministrado.

Q = cantidad total de calor que necesita el proceso.

θ = tiempo de duración del proceso.

U = coeficiente de transferencia de calor.

A = área de la superficie caliente.

Δt = diferencia de temperaturas entre la del vapor entrante y la mínima.

En este caso, la cantidad de calor será la siguiente:

$$Q = 1109 W - (89 W + 155,624) \quad \text{B.T.U.}$$

Si reemplazamos W por 16,600 lbs. obtendremos el valor de Q.

De manera que:

$$Q = 16,776,376.0 \text{ B.T.U.}$$

Los otros valores de la ecuación son:

$$\Delta t = 249 - 86 = 163^{\circ}\text{F}$$

$$U = 300.0 \text{ B.T.U./pie}^2 \times ^{\circ}\text{F} \times \text{hora}$$

$$A = ?$$

$$t = 4 \text{ horas}$$

Reemplazando los valores en la ecuación de capacidad, tendremos lo siguiente:

$$\frac{16,776,376 \text{ B.T.U.}}{4 \text{ horas}} = (300 \text{ B.T.U./pie}^2 \times ^{\circ}\text{F} \times \text{hora}) (A) (163^{\circ}\text{F})$$

$$\text{de donde } A = 85.8 \text{ piés}^2$$

Seguidamente se procederá a calcular las dimensiones del evaporador (un sólo evaporador). Se hará en base al material entrante, o sea a las 25,974 lbs (= 11,806 kgs).

Si convertimos el material entrante de peso a volumen tendremos:

$$\text{a) Soln. de cloruro de alum.} = 8,424.0 \times 0.72 = 6,065.3 \text{ lts.}$$

$$\text{b) Solución de H}_2\text{SO}_4 = (1,342 + 5,368) = \underline{6,710.0 \text{ lts.}}$$

$$\text{Total} = 12,775.3 \text{ lts.}$$

Como 1 litro = 1 dm³, entonces el volumen será de 12,775.3 dm³

Para el diseño, vamos a considerar un 10% como factor de seguridad, de modo, que el volumen de diseño V_D será:

$$V_D = 12,775.3 + 1,277.5 = 14,052.8 \text{ dm}^3.$$

Si suponemos una forma cilíndrica, de gran superficie basal, entonces la relación entre el diámetro D y la altura H será la siguiente: $D = 3H$

El volumen de un cilindro es: $V = \frac{\pi D^2 H}{4}$, pero como $D =$

entonces la expresión anterior cambia a:

$$V = \frac{9\pi H^3}{4}$$

de donde $H = \sqrt[3]{\frac{4V}{9\pi}} = 12.5 \text{ piés}$

El diámetro D sería de: $12.5 \times 3 = 37.5 \text{ piés.}$

5) Calcinador:

Para la operación de calcinación se utilizará un calcinador de fuego indirecto. Los calcinadores de fuego indirecto, ya sea continuos o discontinuos, son empleados para un secado a mayores temperaturas que las obtenidas en un equipo rotatorio calentado a vapor. Asimismo, son adecuados para operaciones con gases, ya sea con atmósferas oxidantes, inertes o reductoras.

La unidad consiste esencialmente de una retorta cilíndrica, que está dentro de un horno, también cilíndrico, estacionario revestido interiormente. El último está dispuesto de tal for

ma que la combustión del combustible ocurra en el espacio anular entre la retorta y el horno.

El material puede ser alimentado continuamente en un extremo y descargado continuamente en el otro. La alimentación y la descarga de los sólidos son usualmente llevados a cabo por medio de alimentadores helicoidales o cualquier otro alimentador positivo.

Las temperaturas de operación en estos calcinadores de fuego indirecto están limitadas solamente por consideraciones estructurales; normalmente 800°F para aceros al carbono y 1,200°F para aceros inoxidable. El uso de materiales especiales puede sin embargo permitir una operación de hasta 2,000°F.

En este tipo de calcinadores, la transferencia de calor es principalmente por radiación, de la pared del cilindro a la cama de sólidos. La eficiencia térmica varía de 35 á 65%. Los factores limitantes en la transmisión de calor radican en las constantes de conductividad y radiación de la coraza metálica y de la cama de los sólidos. Conociendo las características de éstos, se puede diseñar el equipo en forma precisa, empleando la ecuación de radiación de Stefan-Boltzmann. Los coeficientes aparentes de transferencia de calor variarán de 3.0 B.T.U./hora x pie² de superficie cilíndrica x °F, en operaciones a baja temperatura hasta 15.0 B.T.U./hora x pie² de superficie cilíndrica x °F, para procesos a alta temperatura.

1) Balance de Materia:

a) Material Entrante	=	4,350.0 kgs. (sulfato hidratado)
b) Material Saliente	:	
1) Sulfato anhidro	=	2,755.0 kgs.
2) Vapor de agua	=	<u>1,595.0</u>
Total	=	4,350.0 kgs.

2) Balance de Energía:

Calor Entrante:

- a) Calor sensible del sulfato hidratado a 20°C
- b) Calor aportado por el combustible.

Calor Saliente:

- a) Calor sensible de sulfato anhidro hasta 550°C
- b) Calor del vapor de agua a 550 °C

Vamos a considerar una eficiencia del calcinador de 50% y un coeficiente aparente de transferencia de calor de 15.0 B.T.U./hora x pié² x °F.

Respecto al calor entrante, sólo se va a considerar al calor aportado por el combustible.

Para calcular el calor sensible del sulfato hidratado (4,350.0 kgs), es necesario conocer el calor específico, que es igual a 0.3 Kcal/kg x °C, de manera que:

$$C_s = 4,350.0 \text{ kgs} \times 0.3 \text{ Kcal/kg} \times \text{°C} (550-20) = 691,650.0 \text{ Kcal}$$

El agua de cristalización o combinación se comienza a liberar a 180°C, por lo que es necesario considerar el agua de cristalización como vapor a esa temperatura y calcular el calor

que requiere este vapor para elevarlo a 550°C.

El calor latente de vaporización a 180°C es 470.0 Kcal/kg.

El calor específico promedio del vapor de agua de 180 á 550°C es 0.5 Kcal/kg x °C.

Calor latente de vaporización = 470.0 Kcal/kg \times 1,595.0 kgs =
749,650.0 Kcal.

Calor sensible del vapor hasta 550°C = 1,595 x 0.5 x
(550 - 180) = 29,510.0 kcal.

Calor total que debe suministrarse = 691,650 kcal.

749,650 "

29,510 "

1,470,810 kcal.

Como la eficiencia de estos calcinadores es generalmente 60%, entonces el calor total a suministrarse será de:

$Q_T = 1,470,810 + 40\% \text{ de } 1,470,810 = 2,059,134.0 \text{ kcal.}$

Como este calor debe suministrarse en 3 horas, entonces la cantidad de kilocalorías por hora será de:

$Q_T/\text{hora} = \frac{2,059,134.0 \text{ kcal}}{3 \text{ horas}} = 686,378 \text{ kcal/hora}$

La ecuación de capacidad es la siguiente:

$$q = U A \Delta t_m.$$

$q = 2,720,000 \text{ B.T.U./hora, } U = 15.0 \text{ B.T.U./hora} \times \text{pie}^2 \times \text{°F,}$

$A = ? \text{ y } \Delta t_m = 952 \text{ °F.}$

Reemplazando los valores anteriores en la ecuación de capacidad se tiene lo siguiente:

$$2^{\circ}720,000 \text{ B.T.U./hora} = (15.0 \text{ B.T.U./hora} \times \rho F \times \text{pie}^2)$$

$$(A) (952 \rho F)$$

de donde $A = 1,936 \text{ piés}^2$.

Para determinar las dimensiones del horno (diámetro y altura), es necesario conocer el área lateral de un cilindro, que es igual a: πDH .

Además, en este tipo de calcinadores, la relación entre el diámetro y la altura es como 1 es a 1.2, de modo que $H = 12D$.

Reemplazando en la ecuación para el área tendremos lo siguiente:

$$1,936 \text{ piés}^2 = 3.14 \times (D) \times (12D)$$

$$D^2 = \frac{1,936}{3.14 \times 12} = 51.13, \text{ de donde } D = 7 \text{ piés}$$

De manera que $H = 12 \times 7 = 84 \text{ piés}$.

Necesidad o requerimiento de combustible:

Si se utiliza un combustible fuel oil, de un poder calorífico de 19,000 B.T.U./lb, entonces la cantidad requerida de combustible será:

$$\text{Comb.} = \frac{2^{\circ}720,000 \text{ B.T.U./hora}}{19,000 \text{ B.T.U./lb.}} = 144 \text{ lbs/hora.}$$

Además, el combustible debe tener una intensidad de llama de unos 650 °C.

6) Sistema de Condensación:

Para el diseño de un sistema de condensación, se requiere de determinar el nº de tubos y la longitud de éstos.

Como en los anteriores diseños, primero se hará un balance de materia:

Materiales Entrantes

1) Vapor
(HCl + H₂O) = 7,456.0 kgs.
Total = 7,456.0 kgs.

Materiales Salientes

1) Vapor de agua
condensado = 5,636.0
2) Cloruro de
hidrógeno ga-
seoso = 1,820.0
Total = 7,456.0

La composición del gas a enfriar es la siguiente:

- 1) 75.5% de vapor de agua.
- 2) 24.5% de cloruro de hidrógeno gaseoso.

La velocidad de entrada del gas es 6.0 mt./seg. La temperatura de entrada del gas al condensador es de 90°C. La presión absoluta a la que entra este vapor es de 2.0 atm. El tiempo de condensación es de 5 horas.

A continuación se procederá a calcular los volúmenes de los gases entrantes, a 90°C y a 2.0 atm. absolutas.

$$\text{m}^3 \text{ de vapor de agua} = \frac{(5,636 \text{ kg}) (22.4 \text{ m}^3) \times (363) (1)}{(18.0) (273) (2)} = 4,661.0 \text{ m}^3$$

$$\text{m}^3 \text{ de HCl gaseoso} = \frac{(1,820.0 \text{ kg}) (1) (22.4 \text{ m}^3) (363) (1)}{(36.5) (273) (2)} = 743.0 \text{ m}^3$$

De modo que el volumen total es de 5,404 m³.

Entonces el volumen por hora será de: 5,404 m³/5 horas =

$$1,080.8 \text{ m}^3/\text{hora.}$$

El gas circula por el interior de tubos de cobre de 40 mm. de diámetro. El agua de enfriamiento circula por el espacio

que queda entre los tubos de 40 mm y 60 mm de diámetro, en contracorriente con el gas, y entra a 4°C, con una velocidad de 0.3 mt./seg.

Cálculo del número de tubos:

El área recta del tubo de 40 mm. es 0.001256 m^2 .

A la velocidad de 6 mt./seg, cada tubo permitirá el paso de:

$$(0.001256 \text{ m}^2) (6.0 \text{ mt/seg}) (3,600 \text{ segs/hr}) = 27.13 \text{ m}^3/\text{hrs de gas.}$$

De modo que el nº de tubos de enfriamiento colocados en paralelo será:

$$\text{nº de tubos colocados en paralelo} = \frac{1,080.8 \text{ m}^3/\text{hora}}{27.13 \text{ m}^3/\text{hora}} = 40 \text{ tubos.}$$

Cálculo del calor a transmitir:

Si sabemos que el calor latente de vaporización del agua es 540 kcal/kg y que el calor específico del agua es 1.0 kcal / kg x °C, entonces el calor desprendido por los 5,636.0 kgs de agua será:

$$\begin{aligned} 1) \text{ calor latente de vaporización} &= 5,636.0 \text{ kgs} \times 540 \text{ kcal/kg} \\ &= 3,043,440 \text{ kcal.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 2) \text{ calor sensible de } 90 \text{ a } 15^\circ\text{C} &= 5,636.0 \text{ kgs} \times 1 \text{ kcal/kg} \times 90 \\ &= 422,700 \text{ kcal.} \end{aligned}$$

En lo que respecta al HCl, el calor que éste debe desprender será:

$$1,820.0 \text{ kgs} \times 0.19 \text{ kcal/kg} \times 90 \times (90-15) = 3,458.0 \text{ kcal.}$$

De modo que el total de kilocalorías será: 3,043,000 kcal.

$$\begin{array}{r} 422,700 \\ 3,458 \\ \hline 3,469,158 \text{ kcal.} \end{array}$$

Como el tiempo total que dura el proceso de condensación es de 5 horas, entonces el calor desprendido por hora será:

$$Q_T = \frac{3,469,598 \text{ kcal}}{5 \text{ horas}} = 693,919 \text{ kcal/hora}$$

Cálculo de la temperatura de salida del agua:

$$\text{Area de la sección recta del tubo de 60 mm de diam.} = 0.002826 \text{ m}^2$$

$$\text{Area de la sección recta del tubo de 40 mm de diam.} = \underline{0.001257}$$

$$\text{Area del espacio anular} = 0.001569 \text{ m}^2$$

Como tenemos 40 tubos en paralelo, el área total de paso para el agua será de:

$$(40) (0.001569 \text{ m}^2) = 0.06276 \text{ m}^2$$

y al ser la velocidad del agua de 0.3 mt./seg. (= 1,080 mt/hr), la cantidad de agua será:

$$(0.06276 \text{ m}^2) (1,080 \text{ mt/hora}) (1,000 \text{ kgs/m}^3) = 67,780 \text{ kgs/hora.}$$

La elevación de temperatura que experimenta el agua será de:

$$\Delta t = \frac{693,919 \text{ kcal/hora}}{67,780.8 \text{ kg/hora}} = 10.2 \text{ }^\circ\text{C}$$

por lo que el agua saldrá a la temperatura de 14.2 °C.

Cálculo de la diferencia media de temperatura:

$$\Delta t_1 = 90 - 14 = 76 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_2 = 15 - 4 = 11 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_m = \frac{76 - 11}{\ln \frac{76}{11}} = \frac{65}{1.932} = 33.65^\circ\text{C (media logarítmica)}$$

La media aritmética será la siguiente:

$$\text{media aritmética} = \frac{76+11}{2} = \frac{65}{2} = 32.5^\circ\text{C}$$

Cálculo del coeficiente de película del lado del gas:

Para poder calcular este coeficiente, primeramente es necesario conocer si el flujo de gas es turbulento o no, por lo que hay que calcular el número de Reynolds. Las propiedades del gas se toman a la temperatura media de 32.5°C.

Los valores que se necesitan para calcular el número de Reynolds son las siguientes: $D = 0.040$ m.; $u = 6$ m/seg (=21,600 mt./hora); $\mu = 0.0151$ antipoises (= 54.36×10^{-3} kg/hora x mt). Este último valor se extrae de tablas, de acuerdo al diámetro de la tubería por donde circula el gas.

Finalmente, la densidad promedio ρ , se calcula de acuerdo con la siguiente expresión:

$$\rho = \frac{(5,636/4,661) (4,661) + (1,820/743) (743)}{(4,661 + 743)} = 1.38 \text{ kgs/m}^3$$

La fórmula para calcular el número de Reynolds es la siguiente:

$$R_e = \frac{D u \rho}{\mu}$$

Si reemplazamos en dicha fórmula los valores anteriores, tendremos:

$$R_e = \frac{(0.040) (21,600) (1.38)}{(54.36 \times 10^{-3})} = 21,980$$

Para este valor del número de Reynolds, el flujo es turbulento; por lo tanto, la fórmula a aplicar es la siguiente:

$$h = \frac{k}{D} = 0.023 \left(\frac{D u \rho}{\mu} \right)^{0.8} \left(\frac{C_p \mu}{k} \right)^{0.4}$$

donde k es la conductividad térmica promedio de la mezcla.

En este caso, de acuerdo a la composición gaseosa, las tablas dan un valor de 0.02.

Como podemos darnos cuenta, $\left(\frac{D \mu \rho}{A}\right)$ es el número de Reynolds calculado anteriormente, en tanto que $\left(\frac{C \mu}{k}\right)$ es el llamado número de Prandtl, y que de acuerdo a las tablas, tiene un valor de 0.8 para esta mezcla gaseosa.

Despejando el valor de h en la fórmula anterior y reemplazando valores, tendremos lo siguientes:

$$h = \frac{(0.023)(0.02)}{(0.040)} (21,980)^{0.8} (0.8)^{0.4} = 33.4 \text{ kcal/hr} \times \text{m}^2 \times \text{oc}$$

Cálculo del coeficiente de película del lado del agua:

Para calcular el número de Reynolds en este caso, hay que emplear en lugar de D , cuatro veces el factor de forma.

$$\text{Area del espacio anular} = 0.001569 \text{ m}^2$$

$$\text{Perímetro calentado} = \pi D = 3.14 \times 0.04 \times 0.1256 \text{ m.}$$

$$\text{Factor de forma} = 0.001569 \text{ m}^2 / 0.1256 \text{ m} = 0.0125 \text{ m.}$$

$$D = 4(0.0125 \text{ m.}) = 0.05 \text{ m.}$$

$$\mu = 0.3 \text{ m/seg} = 1,080.0 \text{ m./hora}$$

$$\rho = 1,000 \text{ kgs./m}^3$$

$$A = 1.31 \text{ centipoises} (= 4,716 \text{ kg/hora} \times \text{mt.}) \times 10^{-3}$$

$$R_e = \frac{(0.05)(1,080)(1,000)}{(4,716) \times 10^{-3}} = 11,450$$

Este valor de número de Reynolds corresponde al límite superior de la zona de tránsito. Para el valor de $R_e = 11,450$, el valor correspondiente de μ es 42 (ver gráfico). De manera que se puede escribir lo siguiente:

$$42 = \frac{hD/k}{(CA/k)^{1/3}}$$

Para el agua a 42°C, $K = 0.49 \text{ Kcal} \times \text{m.}/\text{hora} \times \text{m}^2 \times \text{°C}$ y

$$P_p = 11.50.$$

Por lo tanto:

$$42 = \left(\frac{h \times 0.05}{0.49} \right) (11.50)^{-0.33}$$

de donde h es igual a: $1,054 \text{ kcal}/\text{hora} \times \text{m}^2 \times \text{°C}$.

Cálculo del coeficiente global:

Como el coeficiente de película del lado del gas es mucho menor que el del lado del agua, el coeficiente total se aproximará al valor del primero, y el calor a transferir se calcula sobre la base de la superficie interior.

$$U = \frac{1}{\frac{1}{ha} + \frac{L}{k} + \frac{1}{kg}}$$

donde L es el espesor de los tubos de cobre, que en este caso es igual a 0.002 m. y k es la conductividad térmica del cobre puro e igual a $333.3 \text{ kcal}/\text{hora} \times \text{m}^2 \times \text{°C}$. Por lo tanto, reemplazando en la fórmula anterior, tendremos:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{1,054} + \frac{0.002}{333.3} + \frac{1}{33.4}}$$

Resolviendo, obtendremos para U un valor de $32.5 \text{ kcal}/\text{hora} \times \text{m}^2 \times \text{°C}$.

Este cálculo permite observar la poca influencia que tiene la resistencia de la pared delgada del tubo de cobre con respec

to a los otros coeficientes.

Cálculo de la superficie de enfriamiento necesaria:

Sustituyendo en la ecuación de capacidad:

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta t_m,$$

por los valores siguientes: $Q = 67,781$ kcal/hora; $U = 32.5$ kcal/hora \times $m^2 \times ^\circ C$ y $\Delta t_m = 33.65^\circ C$, tendremos que A será igual a:

$$A = \frac{Q}{U \cdot \Delta t_m} = \frac{67,781}{32.5 \times 33.65} = 61.9 \text{ m}^2$$

Cada metro de longitud de tubo de 40 mm. de diámetro tiene una superficie interior de aproximadamente 0.15 m^2 , y como son 40 tubos en paralelo, la longitud por tubo será:

$$61.9 \text{ m}^2 / (40 \times 0.15) = 10 \text{ metros por cada tubo.}$$

7) Sistema de Absorción del Cloruro de hidrógeno:

Este proceso de absorción se debe llevar a cabo en las llamadas torres de relleno.

Las propiedades que debe poseer una torre de relleno son las siguientes:

- a) Bajo peso por unidad de volumen.
- b) Gran superficie activa por unidad de volumen.
- c) Gran sección transversal libre.
- d) Gran volumen libre.
- e) Pequeño peso de líquido retenido.
- f) Que el relleno sea barato.
- g) Que tenga una razonable resistencia química.
- h) Que sea químicamente inerte para los materiales que han de manejarse.

En lo que respecta a nuestro sistema de absorción, vamos a emplear un tipo de relleno conocido como anillos Raschig, que es la forma más corriente de relleno de torres. Está formado por anillos cilíndricos de igual altura que diámetro, con espesor de paredes tan delgado como permita el material. Los anillos Raschig de grés varían desde 50 á 150 mm. de diámetro, y un espesor de paredes desde 9.5 á 16 mm.; cuando los anillos se fabrican de metal son más ligeros y proporcionan una mayor sección transversal y un mayor volumen libres. Los anillos Raschig se cargan casi siempre en la torre al azar y no se colocan regularmente, lo que ofrece la mejor combinación de bajo peso por unidad de volumen, volumen libre, sección transversal libre y superficie total de cualquier tipo de relleno. Con frecuencia, los anillos Raschig de grés se fabrican con 2 tabiques en cruz en su interior, lo que incrementa la superficie, sin un gran aumento de peso, ni disminución apreciable de la sección transversal libre.

A continuación, presentamos algunas tablas concernientes con los anillos Raschig.

Valores de a/F^3

Tipo de Relleno	Valor de a/F^3
Anillos Raschig, 6.0 mm.	7.640
" " 9.5 mm.	1.480
" " 12.5 mm.	1.330
" " 16.0 mm.	1.150
" " 19.0 mm.	700

Tipo de Relleno	Valor de a/F^3
Anillos Raschig, 25.0 mm.	565
" " 31.0 mm.	305
" " 38.0 mm.	330
" " 50.0 mm.	220

Caída de Presión en el punto de Inundación

Relleno	mm.	mm. de H ₂ O por m. de altura de relleno
anillos Raschig	51	210
" "	38	210
" "	31	200
" "	25	250
" "	25	330
" "	19	250
" "	16	210
" "	12.5	290

Datos para el diseño de la torre:

El peso de cloruro de hidrógeno a pasar es 1,820 kgs.

El volumen ocupado por estos 1,820 kgs., en condiciones normales, será de 1,118 m³ de manera que la densidad promedio del gas será:

$$\rho = \frac{1,820.0 \text{ kgs.}}{1,118 \text{ m}^3} = 1.629 \text{ kgs/m}^3$$

El tiempo de paso del gas será de 3 horas.

Como el líquido que va a absorber el gas es agua, entonces su densidad será de 1,000 kgs/m³. Su viscosidad, a tempera-

tura ordinaria, es de 1.3 centipoises. Como el tiempo de pa-
so del gas será de 3 horas, y serán 1,820 kgs., entonces la
cantidad de gas que debe entrar por hora será:

$$\text{Gas HCl por hora} = \frac{1,820.0 \text{ kgs.}}{3 \text{ horas}} = 606.0 \text{ kgs./hora.}$$

La solubilidad del HCl gaseoso en agua a 50C y a 500 mm de
mercurio es la siguiente: Se disuelven 75 partes por peso de
cloruro de hidrógeno por cada 100 partes por peso de agua, de
manera que la cantidad mínima de agua, en contracorriente con
el cloruro de hidrógeno gaseoso será:

$$\text{Agua} = \frac{606 \text{ kgs./hora}}{0.75} = 808.0 \text{ kgs./hora}$$

Generalmente casi nunca se considera la cantidad teóricamente
calculada. En la mayoría de los casos el exceso varía desde
un 25% a un 80%. En nuestro caso vamos a considerar el exce-
so mínimo, o sea 25%.

Por consiguiente, la cantidad real de agua necesitada será:

$$\frac{808.0 \text{ kg/hora}}{0.75} \approx 1,000 \text{ kg/hora}$$

Cálculo del diámetro de la torre correspondiente al punto de
Inundación:

Se va a utilizar una torre de absorción rellena con anillos
Raschig de 25 mm., colocados al azar, por lo que a $\sqrt{F^3} = 528$

De modo que se tendrá lo siguiente:

$$\frac{G_{LF}}{G_{GF}} = \frac{1,000/S}{606/S} = 1.65$$

de donde:

$$\left(\frac{G_{LF}}{G_{GF}} \right) \left(\frac{\rho_G}{\rho_L} \right)^{0.5} = 1.65 \frac{1.629}{1,000}^{0.5} = 0.068$$

Para un valor de 0.068, el gráfico 9.5 del capítulo de "Absorción de Gases" del libro "Introducción a la Ingeniería Química" de Badger y Banchero un valor correspondiente a 0.17.

De modo que:

$$0.17 = \left(\frac{G_{GF}}{3,600} \right)^2 \left(\frac{a_v}{F^3} \right) \left(\frac{\mu_L}{\rho_L \rho_g} \right)^{0.2}$$

Donde reemplazando valores, tendremos lo siguiente:

$$0.17 = \left(\frac{G_{GF}}{3,600} \right)^2 (528) \left(\frac{(1.3)^{0.2}}{(1.629)(1,000)(9.81)} \right)$$

donde G_{GF} resulta igual a 7,956 kg./hora x m^2 .

La sección recta de la columna de la torre será:

$$S = \frac{606.0 \text{ kg/hora}}{7,956.0 \text{ kg/hora x } m^2} = 0.0762 \text{ m}^2$$

De manera que el diámetro será igual a:

$$\text{Diámetro} = \sqrt{\frac{4}{\pi} 0.0762 \text{ m}^2} = 0.31 \text{ mt } (= 31 \text{ cms.})$$

Como en la práctica una torre no puede operar en las condiciones correspondientes al punto de inundación, este razonamiento da el diámetro mínimo de la torre. Prácticamente, se consideran como seguras las velocidades próximas al 50% de las del punto de inundación, por lo que la sección recta real sería aproximadamente el doble de la calculada anteriormente,

digamos unos 0.1524 m^2 , y al diámetro correspondiente sería:

$$D_R = \sqrt{\frac{4}{\pi} 0.1524 \text{ m}^2} = 0.44 \text{ mt} (= 44 \text{ cms})$$

Cálculo de la caída de presión por metro de altura de relleno:

Como el diámetro real es 0.44 mt. , entonces el área correspondiente será igual a 0.1524 m^2 .

De manera que:

$$G_G = \frac{606.0 \text{ kg/hora}}{0.1524 \text{ m}^2} = 3,980 \text{ kg/hora} \times \text{m}^2$$

$$G_L = \frac{1,000.0 \text{ kgs.}}{0.1524 \text{ m}^2} = 6,556.0 \text{ kg/hora} \times \text{m}^2$$

Como la viscosidad del agua es 1.3 centipoises , entonces su viscosidad cinemática será:

$$\frac{1.3 \text{ centipoises}}{1.0} = 1.3 \text{ centistokes.}$$

De la tabla 9.2, y para anillos Raschig de 25.0 mm. , se obtiene el siguiente dato:

$$(\Delta P_F)_{H_2O} = 330 \text{ mm./m.}$$

Del gráfico 9.6 y para una viscosidad cinemática de 1.3 centistokes ,

$$(\Delta P_F)_L / (\Delta P_F)_{H_2O} = 0.95$$

de donde se obtiene que $(\Delta P_F)_L$ será igual a:

$$(\Delta P_F)_L = 0.95 \times 330 = 313.5$$

De la fig 9.7, $(G_L)_{\min} = 90,000 \text{ kg/hora} \times \text{m}^2$. Puesto que la velocidad de líquido utilizado $(6,556 \text{ kgs/hora} \times \text{m}^2)$ es menor que ésta, la torre no opera en la región de fase líquida continua. El valor de G_G en el punto de inundación que corresponde a G_L igual a $667 \text{ kg/hora} \times \text{m}^2$, se obtendrá del gráfico 9-10.

$$\left(\frac{G_L}{3,600} \right)^2 \left(\frac{a}{F^3} \right) \left(\frac{ML}{\rho L^2 g} \right)^{0.2}$$

Reemplazando valores en la fórmula anterior tendremos:

$$\left(\frac{6,556}{3,600} \right)^2 (528) \frac{(1.3)^{0.2}}{(1,000)^2 \times 9.81} = 0.0001885$$

Para un valor de 0.0001885, $\frac{G_L}{G_{GF}} \left(\frac{\rho_G}{\rho_L} \right)^{0.5}$ será igual a 0.029 (de acuerdo al gráfico 9-10).

De modo que:

$$G_{GF} = \left(\frac{6,556}{0.029} \right) \left(\frac{1.629}{1,000} \right)^{0.5}$$

De donde $G_{GF} = 9,130.4$

De manera que:

$$\frac{G_{GF}}{G_G} = \frac{9,130.4}{3,980.0} = 2.293$$

De la figura 9-9, para $\frac{G_{GF}}{G_G} = 2.293 \frac{(\Delta P)_L}{(\Delta P_F)_L} = 0.06$

De modo que:

$$(\Delta P)_L = (0.06) (313.5 \text{ mm./m}) = 18.81 \text{ mm. de H}_2\text{O}$$

por m. de altura de
relleno.

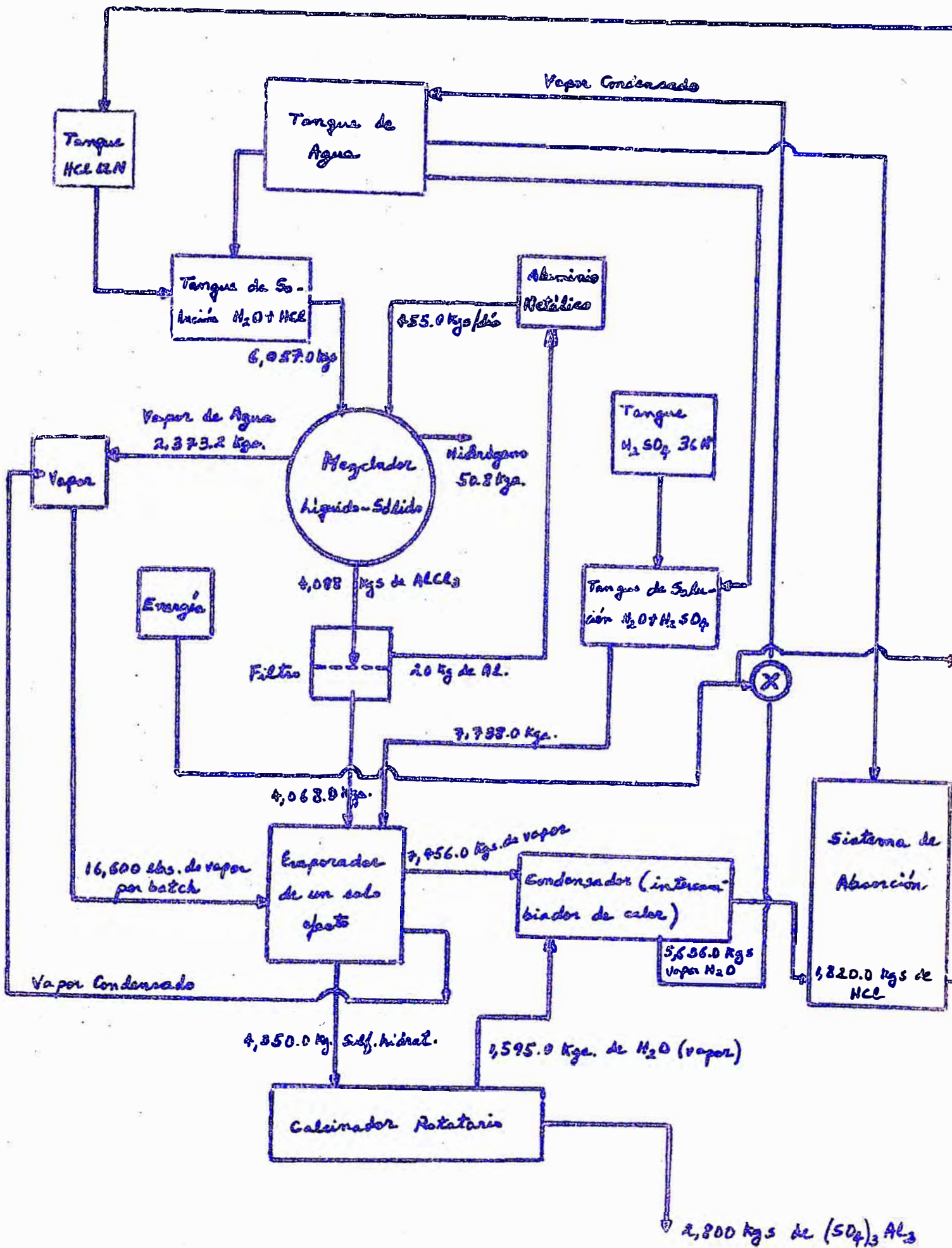
Con este dato y con la diferencia de presión entre los extremos del relleno se puede proceder a calcular la altura más conveniente para el relleno.

a) Explicación del Diagrama de Flujo Cuantitativo del Proceso

1) Tanques de Almacenamiento:

- Tanque HCl 12N: Este tanque será de acero resistente a la corrosión, de forma cilíndrica (de altura y diámetro iguales a 23.0 dm.). Su capacidad debe ser de 9,266.4 litros, lo que representa una carga para 2 días de trabajo.
- Tanque H₂SO₄ 36N: Este tanque también será de forma cilíndrica (diámetro y altura iguales a 13.2 dm.) y resistente a la corrosión. Su capacidad deberá ser de 2,952.4 litros, lo que representa una carga para 2 días de trabajo.
- Tanque Solución HCl + H₂O: También de forma cilíndrica, con una altura y diámetro iguales a 20.5 dm. La capacidad que debe albergar es de 6,662.7 litros, lo que representa la carga para un día de trabajo. Debe ser de acero resistente a la corrosión.

8. Diagrama de Flujo Cuantitativo del Proceso :



- Tanque Solución $H_2SO_4 + H_2O$: De forma cilíndrica, con una altura y diámetro iguales a 22.4 dm. La capacidad de dicho tanque debe ser de 8,511.8 litros, lo que representa una carga para un día de trabajo. También deberá estar construido de un acero resistente a la corrosión.
- Tanque para agua destilada: También de forma cilíndrica como los anteriores, con una altura y diámetro iguales a 30.0 dm. Su capacidad deberá ser de 21,076 litros. El acero de que esté construido no necesita ser resistente a la corrosión.

2) Mezcladores líquido-sólido:

Estos reactores deberán tener agitación propia (mediante paletas rotatorias) y serán de forma aproximadamente esférica. Además, estarán revestidos interiormente con material sintético resistente a la corrosión y abrasión. Cada uno deberá tener una capacidad de 8,592.5 litros. El diámetro del reactor deberá ser igual a 23 dm.

3) Filtros Primarios:

Solamente se requieren para efectuar una separación fácil de la solución con partículas sólidas en suspensión. Serán 2 en total, uno para cada mezclador líquido-sólido. Constarán de una parte cilíndrica (1.80 mt. de diámetro x 0.80 mt. de altura) anexada a una parte cónica trunca (diámetro superior de 1.80 mt, diámetro inferior

de 0.40 mt. y una altura de 1.50 a 2.00 mt.). Estará provisto de una malla metálica soportada por una base de acero más resistente.

4) Evaporador de un Solo Efecto:

Deberá tener una capacidad para retener unos 11,806 kgs de solución aproximadamente. Estará construido de acero resistente a la corrosión y tendrá una forma aproximadamente cilíndrica, (con un diámetro igual 37.5 piés y una altura de 12.5 piés). Debe tener una superficie de calentamiento de 85.8 piés². El calor para la evaporación será suministrado por medio de vapor. Asimismo, contará con un adecuado sistema para la evacuación de los vapores producidos y conducirlos al condensador. También deberá contar con un sistema de agitación que mantenga a la masa en constante movimiento.

5) Calcinador:

Se le puede considerar como un horno rotatorio horizontal cilíndrico, con suministro indirecto de calor. Deberá tener un área periférica de 1,936 piés². Las dimensiones serán: 7 piés de diámetro por 84 piés de altura. El calentamiento será realizado por medio de la combustión de un combustible, que puede ser petróleo, con un poder calorífico igual a 19,000 B.T.U./lb. El calcinador deberá tratar por batch una cantidad de sulfato hidratado igual a 4,350 kgs.

6) Condensador (intercambiador de calor):

El sistema de condensación deberá tratar unos 7,456 kgs. de vapor, procedentes del evaporador en un tiempo de 5 horas. De esos 7,456 kgs de vapor, un 24.5% corresponde al cloruro de hidrógeno. Este sistema deberá constar además de 40 tubos de cobre colocados verticalmente y paralelos de 2 mm. de espesor. El diámetro interior será de 40 mm. y el exterior de 60 mm. de diámetro, quedando un espacio anular por donde circulará el agua de refrigeración. El largo de los tubos será de aproximadamente 10 mt. de altura.

7) Absorbedor de cloruro de hidrógeno:

Este sistema estará constituido por una torre rellena con anillos Raschig de 25 mm. El diámetro real de la torre deberá ser de 44 cms, para que permita el paso de unos 606.0 kg/hora de gas.

C) Arreglo de Planta (Plant Layout)

Un diseño racional debe incluir un ordenamiento, tanto de las áreas de procesamiento, como las de almacenamiento y de las de manipuleo, en coordinación eficiente, y considerando factores tales como:

- Futura expansión.
- Distribución económica del agua, vapor y energía.
- Uso económico de los espacios.
- Requerimiento de edificio.

- Limitaciones geográficas.
- Manipuleo de materiales, etc.

Las facilidades de almacenamiento para los materiales y productos intermedios o terminados pueden estar localizadas en áreas aisladas o en lugares cercanos. Los materiales peligrosos que son amenaza para la vida y seguridad, y sobretodo cuando están almacenados en cantidades considerables, deben ser convenientemente aislados. El almacenamiento en áreas cercanas puede reducir las facilidades para el manipuleo y además ser un obstáculo para la futura expansión de la planta. Asimismo, el almacenamiento debe ser hecho de tal forma que facilite o simplifique el manipuleo.

En lo que respecta al equipo, siempre debe asignarse un espacio bastante amplio a cada parte del mismo. La accesibilidad es un factor importante. En lo posible, siempre se debe ordenar el equipo necesario en grupos de la misma clase, y se debe preferir un proceso gravimétrico.

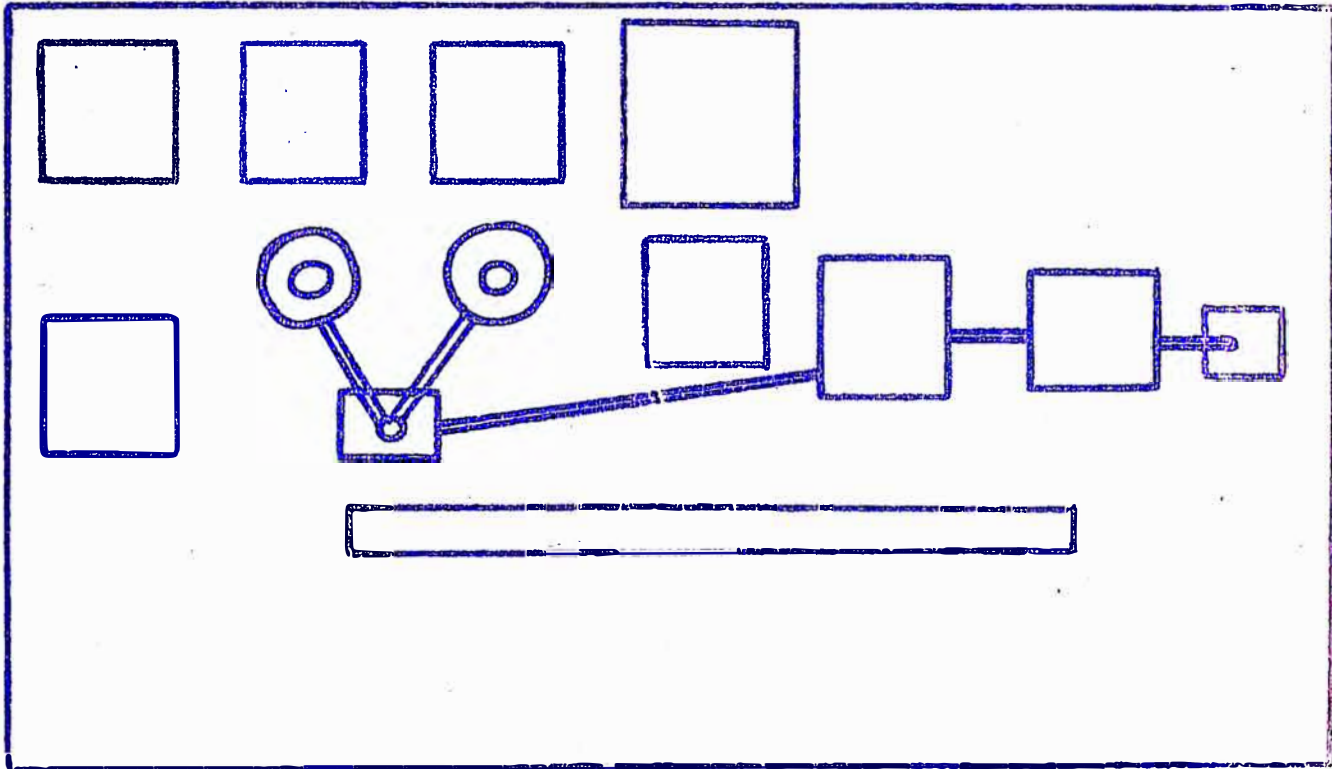
En lo concerniente a los servicios, un buen diseño de éstos puede ayudar enormemente en la operación y reducir los costos de mantenimiento.

En lo relativo al edificio, éste debe ser construido para el proceso y no en el caso contrario, o sea que el proceso satisfaga el diseño convencional de un edificio determinado.

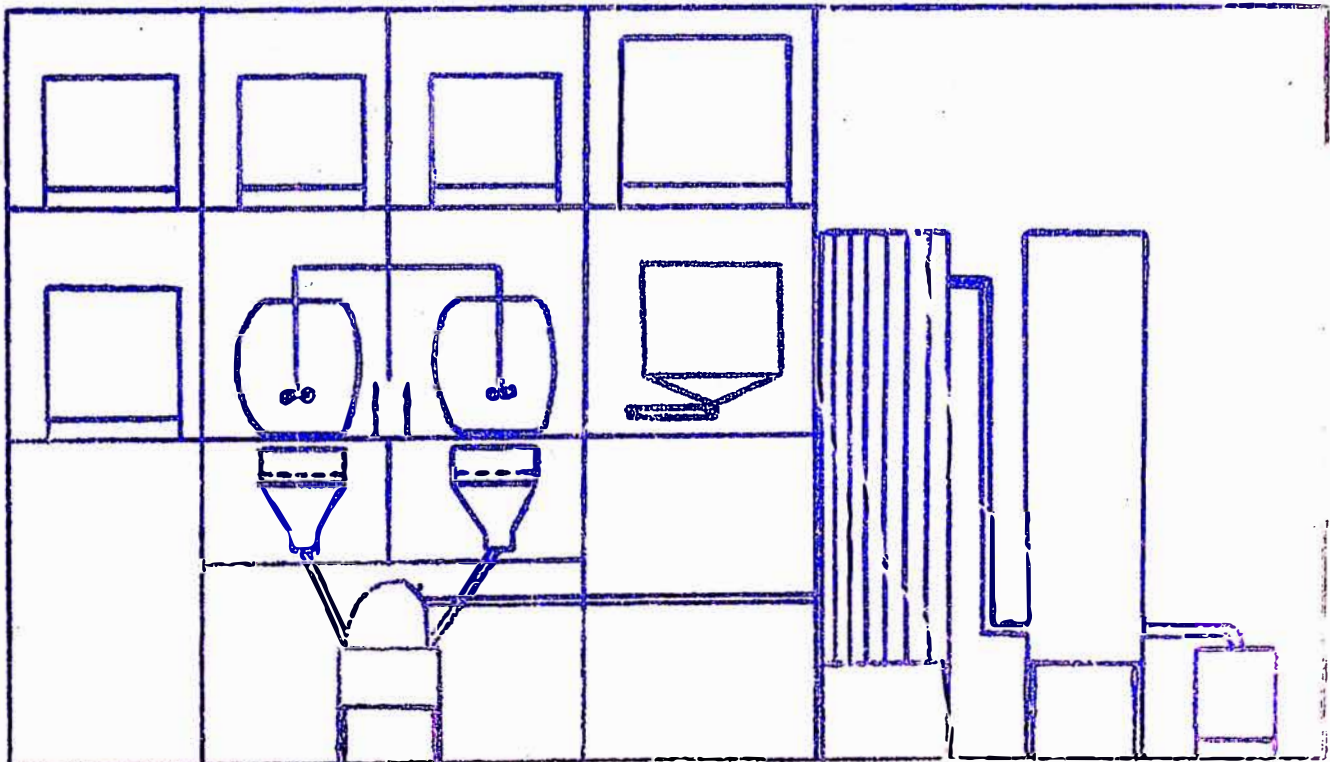
Hasta aquí hemos visto aspectos bastante generales, pero de mucha importancia en lo relativo a la distribución de planta.

A continuación presentaremos un plan de distribución y uno de elevación del proyecto que estamos desarrollando.

1) Plan de Distribución



2) Plan de Elevación



IV) Economía General

A) Localización de la Planta

La planta estará ubicada dentro del perímetro de los terrenos de la fundición de la Cerro de Pasco en La Oroya.

La planta va a utilizar una materia prima, la chatarra de aluminio de los cátodos de la planta electrolítica de zinc, ácido sulfúrico fabricado aquí en la compañía y ácido clorhídrico comercial (muriático) que podrá ser purificado en el sistema de absorción de cloruro de hidrógeno de la planta, produciéndose de este modo un ácido químicamente puro para el proceso.

En cuanto a la mano de obra, no habrá problemas, ya que podría ser cubierto por el personal de la compañía.

Tampoco habría problemas en lo que concierne a energía eléctrica, así como de disponibilidad de agua.

En resumen, se dan las condiciones casi ideales para llevar a cabo la planta.

Para la realización del cálculo económico, en primer lugar se deben considerar dos inversiones. La inversión total es la suma del capital fijo y del capital de operación. Luego de considerar la inversión total, determinaremos el costo de la unidad de producto, para luego pasar a considerar el análisis económico del proyecto. Esto comprende las utilidades, neta y bruta, rentabilidad (retorno antes de los impuestos, retorno después de los impuestos y tiempo de recuperación).

B) Estimación de Inversiones

1. Determinación del Capital Fijo:

a) Costo del equipo principal ya instalado. (Estos datos de costos han sido extraídos de gráficos del libro de Chilton en el capítulo: Process Equipment Costs)

- 1) Tanques de almacenamiento de ácidos y soluciones acuosas, de forma cilíndrica (altura igual al diámetro. Son 5 en total y de diferentes dimensiones 216,000
- 2) Mezcladores líquido-sólido con agitación y de forma esférica, construidos de acero y revestidos interiormente con material sintético resistente a la corrosión. Son 2 en total, con una capacidad de 2,270 galones cada uno . 116,000
- 3) Filtros de tipo primario, de fabricación nacional, de acero y en forma de cilindro-cónico trunco. Son 2 en total 23,220
- 4) Evaporador de un solo efecto, con un área total de calentamiento de 85.8 piés² y con grandes tubos verticales de cobre. Uno en total..
- 5) Calcinador (horno rotatorio de tipo horizontal) Debe tener un área periférica de 1,936 piés². Uno en total
- 6) Condensador (intercambiador de calor), con un área total de transferencia de calor de 61.9m² (= 667.4 piés²) y consta de 40 tubos vertica-

les de cobre de 2 mm de espesor de 40 mm de diámetro. Uno en total	178,020
7) Sistema de Absorción de Cloruro de Hidrógeno. Torre rellena con anillos Raschig de 25 mm. y con un diámetro real de 44 cms (= 111.76 pulg.)	286,380
8) Equipo auxiliar, consistente en 2 bombas....	200,000
Costo total del Equipo instalado	1'420,220

Como el equipo mencionado anteriormente es simple, en casi su totalidad puede ser construido aquí en el país.

b) Tuberías: Para estimar el costo de las tuberías, se va a considerar un 12% del equipo instalado, tal como corresponde a plantas de procesamiento de fluidos, según Chilton	170,426
c) Instrumentación: Se va a considerar un 2% del equipo instalado, ya que la planta tendrá muy poca instrumentación y equipos de control automático	28,404
d) Instalaciones Eléctricas: Se va a considerar un 8% del equipo instalado	113,617
e) Terreno: En este aspecto no se va a considerar ningún gasto, ya que el terreno pertenece a la compañía	-----

f) Edificio: No se requieren mayormente grandes instalaciones. Se va a considerar un 10% del equipo instalado	140,022
g) Servicios: Se considera en este caso un 12% del costo del equipo instalado	<u>170,426</u>
Costo Físico de la Planta (total lo anterior)	2'043,115
Costo de Ingeniería y Construcción: Calculado como el 15% del costo físico de la planta	306,467
Costo Directo = costo físico de la planta + costo de Ingeniería y Construcción.	
= 2'043,115 + 306,467	
= 2'349,582	
Imprevisto: 8% del costo directo	187,966
Capital Fijo = Costo Directo + imprevistos	
= 2'349,582 + 187,966	
= <u>2'537,548</u>	

2. Determinación del Capital de Operación (Co)

Dicho capital se obtiene empleando la siguiente

fórmula:

$$Co = P_m (m + 4M + 0.5 MQ)$$

donde:

P_m = producción mensual en toneladas métricas: 58.0 T.M.

m = costo de materia prima por unidad de produc-

ción:

\$8,826/T.M.

b) Supervisión: Estará a cargo de un solo supervisor, que percibirá un haber mensual de \$11,000, de manera que el monto anual será de	<u>132,000</u>
Total	522,000
3. Mantenimiento: Calculado como:	
6% del costo del equipo principal	85,213
5% del costo del edificio	7,001
25% del costo de instrumentación	<u>7,101</u>
Total	99,315
4. Abastecimiento de Planta: Calculado como el 15% del costo de mantenimiento anual	14,897
5. Servicio: Incluye energía eléctrica, iluminación, agua de refrigeración, vapor, etc. Ya ha sido calculado anteriormente y corresponde a un valor por año de	<u>170,426</u>
Costo Directo	1'422,985
6. Gastos Indirectos:	
a) Sociales: 27% sobre planilla de obreros y 22 % sobre planilla de empleados	134,340
b) Laboratorio: 3% del costo de la mano de obra...	11,700
c) Gastos generales de planta: 40% del costo de la mano de obra	<u>156,000</u>
Total	302,040

7. Depreciación (10% del capital fijo)	253,755
Seguros: 1% del costo fijo de la planta	<u>25,375</u>
Total	279,130

Costo anual de manufactura = 1'422,985

302,040

279,130

Total 2'004,155

Producción anual = 2,900 kg/día x 20 d/m. x 12 m/año =

696,000 kgs.

Costo de manufactura unitaria = $\frac{\text{costo anual de manufactura}}{\text{producción anual}}$

Costo de manufactura unitaria = $\frac{\$2'004,155}{696,000 \text{ kg}}$ = \$2.87 por kilo.

D) Breve Balance Económico

Precio de venta del producto = \$4.20 por kilo (de acuerdo a la lista de precios en el mercado nacional).

Utilidades:

Precio de Venta = 4.20

Costo de Producción = 2.87

Utilidad = \$ 1.33 por kilo.

Utilidad Bruta = 1.33 x 696,000 = \$925,680 por año.

Impuestos a las utilidades = 25% de la utilidad bruta = 231,420

Utilidad Neta = 925,680 - 231,420 = 694,260

E. Indices de Evaluación Económica del Proyecto

1. Retorno antes de los impuestos:

$$\text{R.A.I.} = \frac{\text{utilidad bruta}}{\text{inversión total}} \times 100 = \frac{925,680}{3'719,472} \times 100 = 24.9\%$$

2. Retorno después de los impuestos:

$$\text{R.D.I.} = \frac{\text{utilidad neta}}{\text{inversión total}} \times 100 = \frac{694,260}{3'719,472} \times 100 = 18.7\%$$

3. Tiempo de Recuperación:

$$\text{T.R.} = \frac{\text{inversión total}}{\text{util. neta} + \text{depreciación}} = \frac{3'719,472}{694,260 + 253,755} = 3.2 \text{ años}$$

V) Conclusiones y Recomendaciones

A. En el Aspecto Técnico

1. Trata una materia prima que contiene 100% de aluminio, por lo que no se produce recirculación de material estéril, lo que a su vez también simplifica el flujo del proceso y disminuye la inversión.
2. Toda la materia prima y la mano de obra puede ser fácilmente conseguida.
3. No se producen problemas serios en lo que respecta a impurezas, ya que la chatarra es 100 % aluminio. El cloro del ácido clorhídrico sólo está presente en el residuo final y en una cantidad muy pequeña.
4. Como las reacciones principales son completamente estequiométricas, no se produce ningún desperdicio de reactivo.
5. La torre de absorción del proceso nos permite comprar un ácido clorhídrico comercial (con gran cantidad de impurezas) y purificarlo en ella.
6. Hay facilidades de servicio, tales como agua, vapor, energía, etc.

B. En el Aspecto Económico

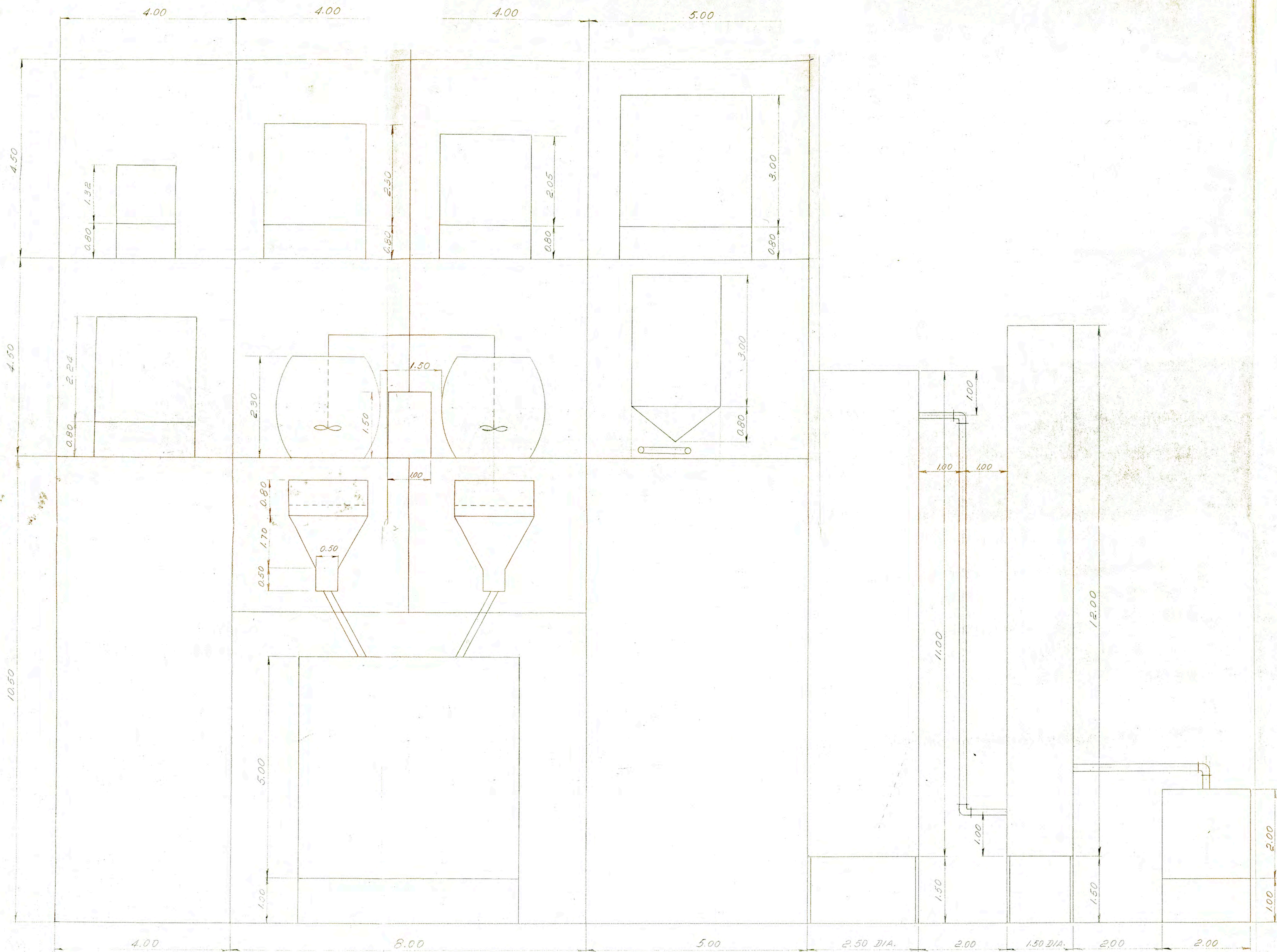
1. El tiempo de pago de la planta es de 3.9 años, pero dicho tiempo puede ser considerado como el máximo posible, ya que el equipo es simple y puede ser construido enteramente aquí en el Perú. De este modo se ahorraría una gran cantidad de dinero.

2. Las ganancias son bastante aceptables, sobretodo tratándose de un proceso que aprovecha una chatarra o desperdicio para producir un reactivo útil en muchos aspectos. Asimismo, debemos considerar que el proceso es discontinuo.

VI) Anexos

A. Bibliografía

- Perry's Chemical Engineer's Handbook by Perry, Chilton and Kirkpatrick.
- British Chemical Plant 1961 by British Chemical Plants Manufacturers Association.
- Chemical Engineering Plant Design by Frank Vilbrandt - Chemical Engineering Series.
- A Comprehensive Treatise on Inorganic and Theoretical Chemistry - Vol. V by J.W. Mellor.
- Handbook of Chemical Engineering by Liddell - Volume I.
- Industrial Chemistry by Riegel.
- Encyclopedia of Chemical Technology by Kirk-Othmer.
- Hydrochloric Acid and Sodium Sulfate by N.A. Laury.
- Inorganic Chemical Technology by Badger and Baker - Chemical Engineering Series.
- Química Industrial por F. H. Thorp.
- Chemical Process Industries by Shreve.
- Thermodynamics by Lewis and Randall.
- Cost Engineering in the Process Industries by Cecil Chilton.
- Ingeniería de la Cinética Química por J. M. Smith.
- Elementos de Química Física de S. Glasstone y D. Lewis.
- Principios de Ingeniería Química por Badger and Banchemo.
- Principles of Chemical Engineering by Walter, Lewis, McAdams and Gilliland - Chemical Engineering Series.



PLANTA DE SULFATO DE ALUMINIO
 PLANO DE DISTRIBUCION
 ELEVACION

DISEÑADO POR: J. BONELLI
 DIBUJADO POR: A.Z.G.
 ESCALA 1:50
 FECHA: 12-VII-73